

---

# Konzeption eines bildbasierten Sensorsystems zur 3D- Indoorpositionierung sowie Analyse möglicher Anwendungen

---

Heft 36  
Schriftenreihe der Fachrichtung Geodäsie  
Fachbereich Bauingenieurwesen und Geodäsie  
Technische Universität Darmstadt  
ISBN 978-3-935631-25-9

---

Darmstadt, November 2012



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT







Verena Händler

Konzeption eines bildbasierten Sensorsystems  
zur 3D-Indoorpositionierung  
sowie Analyse möglicher Anwendungen

---

Schriftenreihe  
Fachrichtung Geodäsie  
Fachbereich Bauingenieurwesen und Geodäsie  
Technische Universität Darmstadt

ISBN 978-3-935631-25-9

Schriftenreihe Fachrichtung Geodäsie der Technischen Universität Darmstadt

Auflagenhöhe: 140 Exemplare

Verantwortlich für die Herausgabe der Schriftenreihe:

Der Sprecher der Fachrichtung Geodäsie  
im Fachbereich Bauingenieurwesen und Geodäsie  
der Technischen Universität Darmstadt

Bezugsnachweis:

Technische Universität Darmstadt  
Institut für Geodäsie, FG Geodätische  
Messsysteme und Sensorik  
Petersenstraße 13  
64287 Darmstadt

ISBN 978-3-935631-25-9

**Konzeption eines bildbasierten Sensorsystems zur 3D-Indoorpositionierung  
sowie Analyse möglicher Anwendungen**

Vom Fachbereich Bauingenieurwesen und Geodäsie  
der Technischen Universität Darmstadt  
zur Erlangung des akademischen Grades  
eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)  
genehmigte Dissertation

vorgelegt von  
Dipl.-Ing. Verena Händler  
aus Lohr am Main

Erstreferent: Prof. Dr.-Ing. Andreas Eichhorn, TU Darmstadt  
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. habil. Volker Schwieger, Universität Stuttgart  
Tag der Einreichung: 10. Januar 2012  
Tag der Disputation: 27. April 2012

Darmstadt, im November 2012

D17



## Abstract

The term *positioning* plays a major role not only for specific measurement purposes but also for everyday applications. The problem of positioning in outdoor environment is solved by *Global Navigation Satellite Systems* (GNSS) to the greatest possible extent. However, localization based on satellite signals fails inside buildings. Therefore, a new field of research has arisen, where alternative methods for positioning within buildings are examined.

In this thesis, a mobile optical sensor system that is based on evaluation methods in the field of computer vision and photogrammetry is designed, which should allow preferably accurate and reliable positioning in a building, using low-cost devices. A cell phone camera is used as sensor system to provide the system for a broad range of users. In this case, the position is determined using a single frame, which contains the projection of an object with four reference points. The object coordinates of the reference points are known. To get the position of the camera according to the object, the object has to be detected and classified in the picture at first. Finally, the image coordinates have to be extracted to determine the position.

First, existing *indoor positioning systems* (IPS), including *optical indoor positioning systems* (OIPS), are categorized according to their methods, their accuracy potential, how they depend on the infrastructure and their economy. The image-based system is also classified with respect to these criteria and its capability for indoor positioning is proved in comparison to different IPS.

The accuracy of an OIPS is determined by the **configuration** of the constellation, the **stability** of the camera and the quality of the **measurements**. These factors have not been studied in detail in existing, low-cost OIPS, so that their accuracy potential can not be declared safely. Therefore, in this thesis, the effects of these factors on the position solution are analyzed, using statistical analysis, before designing an own OIPS.

The effect of the configuration can be reduced by appropriate algorithms. Therefore, three different photogrammetric approaches for determining the position of a single image (two 3-point algorithms and a 4-point algorithm) are studied according to their robustness against bad configurations. The approach that is most robust versus configuration, is tested on its behavior to changes in the internal orientation of the camera as well as to measurement noise. So it is estimated a priori, which stability is required for the cell phone camera and how exact the detection of geo-referenced objects in the image has to be.

For system calibration, two methods, single- and multi-view calibration, are compared. Since the parameters of the internal orientation of a camera can be determined more stable in case of the multi-view calibration,

this method has been used to determine the parameters of the camera and to test them according to their stability.

The measurement data, more precisely the points referring the image to the object coordinate system, have to be determined from one single image. Therefore, two new automated methods for classifying the object coordinates of imaged doors (door edges) and for extracting the door points in the image coordinate system are developed and implemented. The quality of the position largely depends on these measurements. Therefore, the two classification methods are compared according to their robustness by using statistical tests. Furthermore, the accuracy of the extraction of the image coordinates is analyzed. In 68% of the cases the doors are classified correctly. With a mean deviation of position in the image points of  $d_{p'} = 0,02$  mm, a 3D-accuracy  $\leq 1$  m can be achieved even in bad configurations.

For practical use, the most efficient classification method along with the extraction of the image coordinates and the presented 4-point algorithm (Killian, 1955) is implemented as a mobile application. Further test measurements are performed with the system to evaluate its practicality and to analyze potential areas of application.

In most of the cases, the theoretical estimations can be approved for the application in practice. The results of the test measurements show that the 3D-position can be determined with a mean deviation of position of  $d_P = 0,35$  m.

## Zusammenfassung

Der Begriff *Positionierung*, d. h. die räumliche Positionsbestimmung eines Objektes anhand von Koordinaten in einem definierten Referenzsystem, spielt nicht nur für spezielle messtechnische Zwecke eine große Rolle, sondern auch für alltägliche Anwendungen. Im Außenbereich ist das Problem der Positionierung durch *Global Navigation Satellite Systems* (GNSS) weitestgehend gelöst. Allerdings scheitert die Lokalisierung basierend auf Satellitensignalen innerhalb von Gebäuden. Daher hat sich in den letzten Jahren ein neues Forschungsfeld aufgetan, in dem alternative Verfahren zur Positionierung innerhalb von Gebäuden untersucht werden.

In dieser Arbeit wird ein mobiles, optisches Sensorsystem, auf Grundlagen von Auswerteverfahren aus dem Bereich Computer Vision und Photogrammetrie konzipiert, welches kostengünstig eine möglichst genaue und zuverlässige Positionierung in einem Gebäude ermöglichen soll. Als Sensorsystem wird eine Handykamera eingesetzt, um das System einem möglichst großen Kreis von Nutzern zugänglich zu machen. Die Positionsbestimmung erfolgt in diesem Fall anhand einer Einzelaufnahme, welche die Projektion eines Objektes mit vier Referenzpunkten enthält. Die Referenzpunkte besitzen dabei bekannte Objektkoordinaten. Um die Position der Kamera relativ zum Objekt zu erhalten, muss das Objekt zuerst im Bild detektiert und klassifiziert werden. Danach müssen die Bildkoordinaten extrahiert werden, um anschließend die Position bestimmen zu können.

Zunächst werden bestehende *Indoorpositionierungssysteme* (IPS), unter anderem auch *Optische Indoorpositionierungssysteme* (OIPS), nach Kriterien wie Verfahren, Genauigkeitspotenzial, Abhängigkeit von der Infrastruktur und Wirtschaftlichkeit kategorisiert. Das konzipierte, bildbasierte System wird ebenfalls bezüglich dieser Kriterien eingeordnet und im Vergleich zu den übrigen IPS seine Eignung zur Indoorpositionierung herausgearbeitet.

Die Genauigkeit eines OIPS wird durch die **Konfiguration** der Aufnahmestellung, die **Stabilität** der Kamera sowie die Qualität der **Messdaten** beeinflusst. Diese Einflussfaktoren wurden in bereits existierenden, kostengünstigen OIPS bislang nicht näher untersucht, so dass ihr Genauigkeitspotential nicht sicher angegeben werden kann. Vor der Konzeption des eigenen OIPS werden daher die Auswirkungen der genannten Einflussfaktoren auf die Positionslösung in dieser Arbeit anhand statistischer Auswertungen analysiert.

Der Einfluss der Konfiguration kann durch geeignete Algorithmen verringert werden. Daher werden drei verschiedene photogrammetrische Ansätze zur Bestimmung der Position aus einer Einzelaufnahme (zwei 3-Punkt-Algorithmen und ein 4-Punkt-Algorithmus) auf ihre Robustheit gegenüber schlechten Konfigurationen untersucht. Der gegenüber der Konfiguration robusteste Ansatz wird weiterhin anhand statistischer Untersuchungen auf sein Verhalten sowohl gegenüber Veränderungen der inneren Orientierung

der Kamera als auch gegenüber Messrauschen geprüft. Dadurch wird a priori abgeschätzt, welche Stabilität für die Handykamera gefordert ist und wie genau die Detektion georeferenzierter Objekte im Bild stattzufinden hat.

Für die Systemkalibrierung werden zwei Verfahren, das Einzelbild- und das Mehrbildkalibrierverfahren, miteinander verglichen. Da mit dem Mehrbildkalibrierverfahren die Parameter der inneren Orientierung einer Kamera stabiler bestimmt werden können, wird diese Methode verwendet, um die Kameraparameter zu bestimmen und sie weiterhin auf ihre Stabilität hin zu überprüfen.

Für die Bestimmung der Messdaten aus einer Einzelbildaufnahme, d. h. der Referenzpunkte im Objekt- und Bildkoordinatensystem, werden zwei neue automatisierte Verfahren zur Klassifikation der Objektpunkte von auf einen Bildsensor abgebildeten Türen (Türecken) sowie die Extraktion der Türeckpunkte im Bildkoordinatensystem entwickelt und realisiert. Die Genauigkeit der Position hängt zu einem großen Teil von diesen Messdaten ab. Daher werden die beiden Klassifikationsverfahren anhand statistischer Untersuchungen bezüglich ihrer Robustheit miteinander verglichen und die Genauigkeit der Extraktion der Bildkoordinaten analysiert. Mit einem der entwickelten Klassifikationsverfahren ist es möglich, die Türen in 68% der Fälle richtig zu klassifizieren. Die Bildpunkte können mit einer mittleren Punktabweichung  $d_{p'} = 0,02 \text{ mm}$  bestimmt werden. Damit kann auch in ungünstigen Konfigurationen theoretisch eine Positionsgenauigkeit  $\leq 1 \text{ m}$  erreicht werden.

Für den praktischen Einsatz wird die effizienteste Klassifikationsmethode zusammen mit der Extraktion der Bildkoordinaten und dem vorgestellten 4-Punkt-Algorithmus (Killian, 1955) als mobile Anwendung implementiert. Weitere Testmessungen werden mit dem System durchgeführt, um seine Praxistauglichkeit zu evaluieren und mögliche Einsatzbereiche zu analysieren.

Die theoretischen Abschätzungen können in der praktischen Anwendung weitestgehend bestätigt werden. Die Ergebnisse der Testmessungen zeigen, dass die 3D-Position mit dem OIPS im Mittel mit einer Punktabweichung  $d_P = 0,35 \text{ m}$  bestimmt werden kann.



# Inhaltsverzeichnis

<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>15</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>18</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>20</b>
<b>1 Motivation für ein IPS</b>	<b>23</b>
1.1 Einteilung . . . . .	23
1.1.1 Autonome und infrastrukturebundene Systeme . . . . .	23
1.1.2 Präzise und approximative Systeme . . . . .	25
1.2 Mobile Endgeräte für approximative IPS . . . . .	27
1.3 Zusammenfassung Motivation . . . . .	27
<b>2 Stand der Wissenschaft</b>	<b>29</b>
2.1 Näherungsbasierte Verfahren . . . . .	29
2.2 Szenenanalyse-Verfahren . . . . .	30
2.2.1 Signalstärkemessungen . . . . .	30
2.2.2 Optische Szenenanalyse . . . . .	32
2.3 Distanzbasierte Verfahren . . . . .	32
2.3.1 Lateration . . . . .	32
2.3.2 Hyperbelschnittverfahren . . . . .	33
2.4 Winkelbasierte Verfahren . . . . .	34
2.4.1 Triangulation . . . . .	34
2.4.2 Räumlicher Rückwärtsschnitt . . . . .	35
2.5 Optische Systeme . . . . .	36
<b>3 Konzeptionierung eines OIPS</b>	<b>39</b>
3.1 Anforderungsanalyse . . . . .	40
3.1.1 Anforderungen an den Client . . . . .	41
3.1.2 Anforderungen an den Server . . . . .	43
3.1.3 Algorithmen . . . . .	43
3.1.4 Infrastruktur . . . . .	43
3.2 Mögliche Systemarchitektur des OIPS . . . . .	45

<b>4</b>	<b>Geometrische Positionsbestimmung</b>	<b>47</b>
4.1	Koordinatensysteme . . . . .	47
4.1.1	Zusammenhang zwischen Sensor- und Kamerakordinaten . . . . .	48
4.1.2	Zusammenhang zwischen Bild- und Objektkoordinatensystem . . . . .	49
4.2	Ansätze zur Bestimmung der 6 DOF der Kameraorientierung . . . . .	50
4.2.1	Ansätze mit 3-Punkt-Algorithmen . . . . .	50
4.2.2	Ansatz mit 4-Punkt-Algorithmus nach Killian . . . . .	57
4.3	Konfigurationsuntersuchung . . . . .	60
<b>5</b>	<b>Theoretisch erreichbare Genauigkeiten der bildbasierten Positionsbestimmung</b>	<b>65</b>
5.1	Innere Orientierung . . . . .	67
5.2	Bildkoordinaten . . . . .	68
5.3	Objektkoordinaten . . . . .	73
<b>6</b>	<b>Systemkalibrierung</b>	<b>75</b>
6.1	Einzelbildkalibrierung . . . . .	75
6.2	Mehrbildkalibrierung . . . . .	77
6.3	Stabilitätsüberprüfung der inneren Orientierung . . . . .	80
<b>7</b>	<b>Klassifikation und Detektion von Türen</b>	<b>83</b>
7.1	Grundlagen der Bildverarbeitung . . . . .	83
7.1.1	Bildpräsentation . . . . .	83
7.1.2	Nachbarschaftsoperationen . . . . .	85
7.1.3	Kantendetektion . . . . .	86
7.1.4	Objekterkennung . . . . .	89
7.2	Realisierte Verfahren zur Türeckpunktdetektion . . . . .	94
7.2.1	Klassifikation über Zielmarken . . . . .	95
7.2.2	Klassifikation über Referenzbilder . . . . .	97
7.3	Qualitätsanalyse der Türdetektion und -klassifikation . . . . .	101
7.3.1	Robustheit . . . . .	101
7.3.2	Genauigkeit . . . . .	105
7.3.3	Einschränkungen . . . . .	106
7.3.4	Bewertung . . . . .	108
<b>8</b>	<b>Technische Umsetzung des OIPS</b>	<b>111</b>
8.1	Verteilung . . . . .	111
8.2	Server . . . . .	112
8.3	Client . . . . .	113
8.4	Applikation . . . . .	114
<b>9</b>	<b>Evaluation des OIPS</b>	<b>115</b>
9.1	Aufbau einer Testumgebung . . . . .	115

9.2	Zeitanalyse . . . . .	116
9.3	Positionsanalyse . . . . .	117
9.3.1	Schrägstellung . . . . .	118
9.3.2	Entfernung . . . . .	122
9.3.3	Beleuchtung . . . . .	124
9.3.4	Allgemeine Testmessungen . . . . .	124
<b>10</b>	<b>Bewertung der Ergebnisse und Anwendungsanalyse</b>	<b>129</b>
10.1	Messdatenakquise . . . . .	129
10.2	Positionsgenauigkeit . . . . .	129
10.3	Mögliche Ergänzungen . . . . .	130
10.4	Anwendungsanalyse . . . . .	131
<b>11</b>	<b>Abschließendes Fazit</b>	<b>133</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>134</b>



## Abbildungsverzeichnis

1.1	Einteilung von Positionierungsanwendungen . . . . .	25
1.2	Entwicklung von Mobiltelefonen . . . . .	27
2.1	Annäherungsprinzip . . . . .	30
2.2	Fingerprint-Verfahren . . . . .	31
2.3	Active Bat System, Quelle: Bat-System (2002) . . . . .	33
2.4	Triangulationsprinzip . . . . .	35
2.5	Prinzipskizze zum räumlichen Rückwärtsschnitt . . . . .	36
3.1	Gegenüberstellung von Kosten und Genauigkeit verschiedener IPS . . . . .	39
3.2	Georeferenzierung mit codierten Marken oder mit natürlichen Landmarken . . . . .	44
3.3	Ablaufskizze des OIPS-Konzepts . . . . .	45
3.4	Verteilungsdiagramm zur Übersicht über die eingesetzten Systemkomponenten . . . . .	46
4.1	Koordinatensysteme, Quelle: Luhmann (2010a) . . . . .	48
4.2	Ablaufdiagramm a) 3-Punkt-Algorithmen, b) 4-Punkt-Algorithmus . . . . .	51
4.3	Ansatz über drei Passpunktpaare nach Grunert . . . . .	52
4.4	Ansatz über drei Passpunktpaare nach Rohrberg . . . . .	54
4.5	Schnittpunkte der Funktionszweige $a_i(x)$ mit der Konstanten $a$ . . . . .	56
4.6	Ansatz über vier Passpunktpaare nach Killian . . . . .	58
4.7	Bestimmungstücke $\varphi$ , $\psi$ und Vektor $\mathbf{r}$ . . . . .	59
4.8	Generierung von Testdaten . . . . .	61
4.9	Simuliertes Szenario mit gefährlichem Zylinder . . . . .	62
4.10	Vergleich der Ansätze . . . . .	64
5.1	Funktionaler Zusammenhang zwischen Sensor- und Bildkoordinaten . . . . .	66
5.2	Berechnung der Position mit verrauschten Bildkoordinaten $(\tilde{x}', \tilde{y}')_n$ . . . . .	66
5.3	Berechnung der Position mit verrauschten Objektkoordinaten $(\tilde{X}, \tilde{Y}, \tilde{Z})_n$ . . . . .	67
5.4	Einfluss der intrinsischen Parameter auf die Bildkoordinaten . . . . .	68
5.5	Helmert'scher Punktfehler $s_P$ . . . . .	69
5.6	Mittlere Punktabweichung $d_P$ . . . . .	69
5.7	Varianzfortpflanzung der Gauß-verrauschten Bildkoordinaten . . . . .	70
5.8	Histogramm für $P_0 = (2/3/2)$ m . . . . .	72
5.9	Histogramm für $P_0 = (3/5/1,50)$ m . . . . .	72
5.10	Histogramm für $P_0 = (4/7/4)$ m . . . . .	72
5.11	Varianzfortpflanzung der Gauß-verrauschten Objektkoordinaten . . . . .	73

6.1	Kalibrierwürfel . . . . .	76
6.2	Aufnahmen eines planaren Testfelds für Mehrbildkalibrierung . . . . .	78
6.3	Zeitskala mit eingetragenen Kalibrierzeitpunkten (schwarze Kreuze) . . . . .	80
6.4	Relative Änderungen der intrinsischen Parameter und Verzeichnungsparameter . . . . .	81
7.1	Repräsentation eines Bildes als stufenlose (a) und diskrete Funktion (b) . . . . .	83
7.2	Gegenüberstellung Originalbild - Lokaler adaptiver Histogrammausgleich . . . . .	84
7.3	Diskrete Faltung mit einer $3 \times 3$ -Filtermaske . . . . .	86
7.4	Ablauf Canny Algorithmus . . . . .	88
7.5	Morphologische Operationen Dilatation und Erosion . . . . .	90
7.6	Randextraktion zweier Formen durch wiederholte Erosion und anschließender Subtraktion . . . . .	91
7.7	Randextraktion zweier Formen durch wiederholte Dilatation und anschließender Subtraktion . . . . .	91
7.8	Geradendarstellung in Hesse'scher Normalenform . . . . .	93
7.9	Geradendarstellung im Akkumulatorarray . . . . .	94
7.10	Transformieren und Dekodieren der Zielmarke. . . . .	95
7.11	a) Umhüllende Ellipse, b) Kreisdurchmesser $d$ , c) Rotationswinkel $\omega$ und Hauptachsen der Ellipse $a$ und $b$ . . . . .	96
7.12	Codierung der Außenseite einer Doppeltür mit der Nummer 243. . . . .	97
7.13	a) Kontur des Türobjekts, b) Ergebnis der Türdetektion. . . . .	97
7.14	Unterschiedliche Ansichten derselben Tür. . . . .	98
7.15	Referenzbilder für die Datenbank (in den roten Umrandungen befinden sich jeweils Bilder der selben Tür, aus verschiedenen Perspektiven fotografiert). . . . .	98
7.16	Konturmerkmale, extrahiert a) mit Canny-Edge-Algorithmus und b) mittels Houghtransformation. . . . .	99
7.17	a) Kontur aus Quadtree-Segmentierung, b) Ergebnis aus Vierecksdetektion. . . . .	99
7.18	Normalisiertes Bild mit ROIs. . . . .	100
7.19	Beispiele aus dem Bilddatensatz; obere Reihe: störungsfreie Bilder, untere Reihe: Bilder ohne Türen oder mit Störungen . . . . .	101
7.20	Muster der verwendeten Zielmarke . . . . .	102
7.21	Treffer- und Fehlerquote aus Test A (Dreiecksymbol) und Test B (Quadratsymbol): Zielmarkenmethode = rot, Referenzbildmethode = grün. . . . .	105
7.22	Fehlerhafte Kantendetektion . . . . .	106
7.23	Aufnahmebereiche in der Testumgebung (rot: Bereich für Schrägaufnahmen, blau: Bereich für die Entfernung, grün: codierte Türen) . . . . .	107
7.24	Aufnahmen bei Dunkelheit: a) 4 m-Abstand zur Tür, b) 7 m-Abstand zur Tür . . . . .	108
8.1	Verteilungsdiagramm . . . . .	111
8.2	Komponentendiagramm der Matlab-Umgebung . . . . .	112
8.3	Komponentendiagramm der Client-Umgebung . . . . .	113
8.4	Ablaufskizze der realisierten OIPS-Anwendung . . . . .	114

9.1	Testumgebung: Ostflügel L5/01, 2.Stock (blaue Markierung: Entfernungstestfeld, rote Markierung: Winkeltestfeld) . . . . .	116
9.2	Stabstativ mit Fassung für die Kamera und Dosenlibelle zum Horizontieren . . . . .	116
9.3	Zeitbalken der Prozesskette des realisierten OIPS . . . . .	117
9.4	Winkeltestfeld . . . . .	118
9.5	Entfernungstestfeld . . . . .	122
9.6	Lageplan der Testumgebung . . . . .	126
10.1	Smartphone-Applikationen aus dem Bereich Augmented Reality (Quellen: a) Immonet (2011), b) Technik-Junkie (2011), c) First Media GmbH (2011)) . . . . .	131





## Tabellenverzeichnis

2.1	Eigenschaften infrastrukturegebundener IPS . . . . .	38
3.1	Bildgröße eines 1 cm großen Objektes, aufgenommen in einem Abstand von 10 m. Die Sensorfläche beträgt $5,6 \times 4,2$ mm, die Brennweite $f=6$ mm . . . . .	41
3.2	Standards zur Datenübertragung moderner Smartphones . . . . .	42
3.3	Geeignete Smartphones . . . . .	42
4.1	Vergleich der Algorithmen bei unverrauschten Daten . . . . .	62
5.1	Kalibrierdaten der intrinsischen Parameter . . . . .	67
6.1	Einzelbildkalibrierung C905 . . . . .	77
6.2	Mehrbildkalibrierung C905 . . . . .	79
6.3	Kalibrierdaten der intrinsischen Parameter . . . . .	81
7.1	Test A: Definition des Zwei-Klassen-Problems für Detektion . . . . .	102
7.2	Test B: Definition des Zwei-Klassen-Problems für Klassifikation . . . . .	103
7.3	Test A: Confusion-Matrix für Detektion über Zielmarken . . . . .	103
7.4	Test A: Confusion-Matrix für Detektion über Referenzbilder . . . . .	103
7.5	Test B: Confusion-Matrix für Klassifikation über Zielmarken . . . . .	104
7.6	Test B: Confusion-Matrix für Klassifikation über Referenzbilder . . . . .	104
7.7	Detektionsgenauigkeit bei allen richtig positiv getesteten Bildern . . . . .	106
7.8	Korrekte Identifizierung der Türen bei unterschiedlicher Beleuchtung . . . . .	107
9.1	Ausschnitt der Speicherung der Türdaten . . . . .	115
9.2	Ergebnisse aus simuliertem Winkelfeld . . . . .	119
9.3	Testergebnisse aus realem Winkelfeld . . . . .	119
9.4	Nicht verworfene Hypothese (9.1) und (9.4) im Winkelfeld . . . . .	121
9.5	Ergebnisse aus simuliertem Entfernungsfeld . . . . .	122
9.6	Testergebnisse aus realem Entfernungsfeld . . . . .	123
9.7	Nicht verworfene Hypothese (9.1) und (9.4) im Entfernungsfeld . . . . .	123
9.8	Testergebnisse bei unterschiedlichen Lichtverhältnissen . . . . .	124
9.9	Testergebnisse der Einzelmessungen in der gesamten Testumgebung . . . . .	127



## Abkürzungsverzeichnis

<b>AP</b>	Access Point
<b>App</b>	Applikation
<b>AR</b>	Augmented Reality
<b>BITKOM</b>	Bundesverband Informationswirtschaft, Telekommunikation und neue Medien e.V.
<b>CAD</b>	Computer Aided Design
<b>CLIPS</b>	Camera and Laser Indoor Positioning System
<b>C905</b>	Cybershot-Handy C905 von Sony Ericsson
<b>DGPS</b>	Differential Global Positioning System
<b>DOF</b>	Degrees of Freedom
<b>GNSS</b>	Global Navigation Satellite System
<b>GPS</b>	Global Positioning System
<b>GSM</b>	Global Systems for Mobile Communications
<b>GUI</b>	Graphical User Interface
<b>HNF</b>	Hesse'sche Normalform
<b>HSDPA</b>	High Speed Download Packet Access
<b>HSUPA</b>	High Speed Uplink Packet Access
<b>HTTP</b>	Hypertext Transfer Protocol
<b>IPS</b>	Indoorpositionierungssystem
<b>LBS</b>	Location Based Services
<b>LoS</b>	Line of Sight
<b>LTE</b>	Long Term Evolution
<b>M</b>	Mobilstation
<b>MCR</b>	Matlab Compiler Runtime
<b>MEMS</b>	Mikroelektronische Mechanische Systeme

<b>MkQ</b>	Methode der kleinsten Quadrate
<b>NLoS</b>	Non Line of Sight
<b>OIPS</b>	Optisches Indoorpositionierungssystem
$P_0$	Position der Mobilstation
<b>PNS</b>	Positionierungs- und Navigationssystem
<b>POI</b>	Point Of Interest
<b>QR</b>	Quick Response
<b>R</b>	Referenzstation
<b>RFID</b>	Radio Frequency Identification
<b>ROC</b>	Receiver Operating Characteristics
<b>ROI</b>	Region of Interest
<b>RWS</b>	Räumlicher Rückwärtsschnitt
<b>SIFT</b>	Scale-invariant feature transform
<b>SLAM</b>	Simultaneous Localization and Mapping
<b>SURF</b>	Speeded Up Robust Features
<b>SVG</b>	Scalable Vector Graphics
<b>UMTS</b>	Universal Mobile Telecommunications System
<b>UWB</b>	Ultra Wide Band
<b>Wi-Fi</b>	Wireless-Fidelity: Firmenkonsortium, das Produkte mit Funk-Schnittstellen zertifiziert, die auf Basis des IEEE 802.11 Standards entwickelt werden (Blankenbach et al., 2007)
<b>WLAN</b>	Wireless Local Area Network

# 1 Motivation für ein IPS

Im heutigen modernen Zeitalter existiert das Bestreben, möglichst überall und zu jedem Zeitpunkt innerhalb weniger Sekunden Informationen über den aktuellen Standort abrufen zu können. Aus diesem Grund wächst der Markt mobiler Endgeräte wie Netbooks, Smartphones oder Navigationsgeräte mit integrierten Funktionen zur Positionsbestimmung. Mit diesen mobilen Endgeräten könnten beliebige Informationen vom Nutzer zu jeder Zeit abgerufen werden. Für Informationen und Dienste, die vom aktuellen Standort abhängen - sogenannte *Location Based Services* (LBS) - muss die Position des Nutzers permanent und zuverlässig abgerufen werden können. Neben der immer verfügbaren und korrekten Ortung für LBS wird für viele messtechnische Anwendungen wie z.B. die Baufortschrittsdokumentation eine möglichst präzise Positionsangabe benötigt. Dabei können durchaus Genauigkeiten im cm-Bereich gefordert sein (Pflug, 2008).

Im Außenbereich kann die Position einer Person mit einem entsprechend ausgestatteten mobilen Endgerät durch Globale Navigationssatellitensysteme (GNSS) meist mit ausreichender Genauigkeit bestimmt werden. GNSS werden immer häufiger in mobilen Navigationssystemen eingesetzt, die für den alltäglichen Gebrauch auch in modernen Mobiltelefonen integriert sind. Sobald sich der Nutzer allerdings in ein Gebäude begibt, erweist sich eine störungsfreie Lokalisierung mittels GNSS als problematisch, da die Satellitensignale zu sehr abgeschwächt werden und Multipatheffekte auftreten können. Doch auch innerhalb von Gebäuden, insbesondere in öffentlichen Einrichtungen wie Parkhäusern, Museen, etc., besteht der Wunsch nach einer zuverlässigen Positionsangabe und Navigationshilfe. Daher hat sich in den letzten Jahren die *Indoorpositionierung* als neues Forschungsfeld aufgetan. Eine Vielzahl neuer Methoden und Systeme zur Indoorpositionierung (*Indoorpositionierungssysteme*, IPS) wurde in den letzten Jahren entwickelt und untersucht, doch ein massentaugliches IPS ist bislang noch nicht verfügbar.

## 1.1 Einteilung

IPS unterscheiden sich sowohl bezüglich der eingesetzten Messsensoren als auch durch ihre Positionierungsmethoden. Daher gibt es verschiedene Möglichkeiten, sie zu kategorisieren.

### 1.1.1 Autonome und infrastrukturegebundene Systeme

Ein Unterscheidungsmerkmal ist die Abhängigkeit von der Umgebung. *Infrastrukturegebundene* Systeme benötigen Informationen über ihre Umgebung, um die eigene Position bestimmen zu können. Sie müssen daher in der Lage sein, mit ihrer Umwelt zu kommunizieren und Daten auszutauschen. Im Gegensatz

dazu kann die Position mit *autonomen* Systemen weitestgehend unabhängig von der Umgebung bestimmt werden.

Da Satelliten als übergeordnete Referenzpunkte angesehen werden können, spricht man im Bezug auf GNSS von autonomer Positionierung, auch wenn die Satelliten im weitesten Sinne als Infrastruktur vorhanden sind und die Positionierung in ihrer Abhängigkeit stattfindet. Ähnliches kann in Zukunft auch für Mobiltelefone als Positionierungssysteme gelten. Hier werden Funkmasten, deren Position im Vorfeld bekannt ist, als Referenzpunkte genutzt und über die empfangbaren Radiosignale die Position des Mobiltelefons bezüglich der erreichbaren Funkmasten bestimmt. Aktuell ist die Netzabdeckung noch nicht überall in ausreichendem Maße vorhanden. Doch die Verfügbarkeit von Funkmasten und die damit einhergehende globale Abdeckung nehmen immer mehr zu, so dass die Ortung über Mobiltelefone in Zukunft ebenfalls der autonomen Sparte zugeordnet werden kann.

Dead-Reckoning-Systeme, die auf Beschleunigungssensoren, Kompass etc. basieren, werden ebenfalls als autonom bezeichnet, da damit eine Trajektorie unabhängig von der Umgebung aufgezeichnet werden kann. Allerdings kann mit diesen Systemen keine absolute Position in einem Referenzsystem ermittelt werden. Um eine aufgezeichnete Trajektorie mit der Umgebung zu referenzieren, müssten zusätzlich wieder infrastrukturegebundene Systeme eingesetzt werden, zumindest zur Bestimmung einer Startposition im Gebäude.

Im Gegensatz zu autonomen Systemen kann mit infrastrukturegebundenen Systemen eine absolute Positionierung in einem Referenzsystem ermittelt werden, wenn die Infrastruktur des Referenzsystems im Vorfeld bestimmt und markiert worden ist. Die Markierung kann über bestimmte Referenzpunkte, wie z. B. *Wireless-Lan* (WLAN) - Access Points (Kitasuka et al., 2003), *Radio Frequency Identification* (RFID) - Tags (Hightower et al., 2000) oder visuelle Marken (Mulloni et al., 2009) erfolgen. Die Position der Markierungen muss dabei im Vorfeld im Referenzsystem bekannt sein. Die unterschiedlichen Verfahren zur Positionsbestimmung mit infrastrukturegebundenen IPS werden in Kapitel 2 detailliert beschrieben.

Im Bereich der Indoorpositionierung werden sowohl autonome als auch infrastrukturegebundene Prototypen entwickelt und untersucht (Thienelt et al. (2006), Filonenko et al. (2010), Klopschitz et al. (2010)). Autonome Systeme liefern schon innerhalb kurzer Zeit Ergebnisse mit Unsicherheiten im Bereich einiger Meter, die gerade innerhalb von Gebäuden keine aussagekräftige Positionsbestimmung zulassen. Mit infrastrukturegebundenen Systemen können zwar höhere Genauigkeiten erzielt werden, jedoch nur, wenn die Umgebung im Vorfeld gut erfasst ist (z. B. durch ein genaues Gebäudemodell) und ausreichend Referenzen zur Verfügung stehen (fest installierte Referenzstationen mit bekannter Position). In jedem Fall reichen die bisher entwickelten autonomen Systeme nicht aus, um eine Position innerhalb von Gebäuden zuverlässig mit einer Abweichung  $< 1$  m zu bestimmen. Die Infrastruktur ist immer notwendig, um hier eine absolute Position angeben zu können. Daher werden in dieser Arbeit ausschließlich infrastrukturegebundene Systeme in Betracht gezogen.

### 1.1.2 Präzise und approximative Systeme

Bei Positionierungssystemen kann unterschieden werden zwischen *präzisen* und *approximativen* Systemen. Der Begriff „präzise“ umfasst bei der hier vorliegenden Einteilung sowohl eine hohe innere als auch äußere Genauigkeit. Bei präzisen Systemen wird die Position als Ausgangspunkt für weitere messtechnische Anwendungen (z. B. Gebäudevermessung) genutzt. Systeme mittlerer bis niedriger Genauigkeit, im Folgenden approximative Verfahren genannt, dienen in erster Linie zur Lokalisierung einer Person (Abbildung 1.1). Mit präzisen Positionierungssystemen können Genauigkeiten im cm-Bereich erreicht werden. Bei approximativen Verfahren liegt die Genauigkeit im dm- oder m-Bereich.



Abbildung 1.1: Einteilung von Positionierungsanwendungen

Im Außenbereich findet man Positionierungssysteme niedriger bis mittlerer Genauigkeit in Navigationsgeräten für den Straßenverkehr sowie für Wanderungen oder Radtouren. Die Positionierung erfolgt hier durch GNSS. Daneben gibt es *Wireless-Fidelity* (Wi-Fi)-basierte Ortungsverfahren, mit denen der Nutzer seine Position schnell genähert bestimmen und sich so Informationen der aktuellen Umgebung beschaffen kann (z. B. Verkehrsanbindungen vom aktuellen Standort). Eine Positionsabweichung  $\leq 10$  m ist hier ausreichend.

Präzise Positionierungsanwendungen in der Ingenieurgeodäsie, die im Außenbereich eingesetzt werden (z. B. Straßen- oder Brückenbau), sind z. B. *Differential Global Positioning Systems* (DGPS) oder klassische Tachymetrie.

Dementsprechend gibt es auch für den Innenbereich unterschiedliche Anwendungen für ein Positionierungssystem. Approximative Systeme für IPS dienen in erster Linie zur Lokalisierung einer Person in

einem Gebäude. Ein Beispiel sind Informationssysteme innerhalb von Gebäuden, bei denen es weniger auf eine präzise, sondern mehr auf eine zuverlässige Positionierung ankommt. Mögliche Szenarien für solch ein Informationssystem sind unter anderem Museumsführer oder Notfalleitsysteme in öffentlichen Gebäuden. Allerdings gilt innerhalb von Gebäuden auch für approximative Verfahren eine höhere Anforderung an die Genauigkeit als im Außenbereich. So ist zum Beispiel eine Positionsangabe mit einer Genauigkeit von 5-10 m für ein Navigationsgerät im Straßenverkehr meist ausreichend, während diese Genauigkeit innerhalb eines Gebäudes bereits dazu führen kann, dass ein falscher Raum zugeordnet wird. Systeme, die für derartige Anwendungen entwickelt werden, stützen sich meist auf WLAN, RFID oder optische Marken (z. B. *Quick Response* (QR) - Codes). Eine Übersicht aktueller approximativer IPS und eine Gegenüberstellung der Genauigkeiten, die derzeit mit diesen Systemen erreicht werden, ist u. a. in Koyuneu & Yang (2010) gegeben.

Zu den präzisen IPS zählen zum Beispiel Anwendungen in der Industrievermessung, bei der aktuell meist Lasertracker oder professionelle Kamerasysteme eingesetzt werden. Bei Anwendungen im Bereich *Augmented Reality* (AR) können ausgehend von der Position und der Orientierung einer Kamera virtuell Informationen zu aufgenommenen Räumlichkeiten eingeblendet werden. Um die Informationen korrekt zu projizieren, bedürfen sie allerdings einer Positionsgenauigkeit im Bereich weniger Zentimeter (Norrdine, 2009).

Präzise Positionierungssysteme sowohl für den Innen- als auch den Außenbereich werden für spezielle messtechnische Anwendungen benötigt, die Fachwissen voraussetzen. Für die geforderten Genauigkeiten von meist  $\leq 1$  cm wird spezielles, teures Messequipment benötigt. Der Einrichtungsaufwand ist entsprechend groß, d. h. die Position ist nicht permanent in kurzer Zeit verfügbar. Bei präzisen Positionierungssystemen steht die Genauigkeit der Positionsbestimmung im Vordergrund, nicht die jederzeit abrufbare Positionsangabe. In diesem Bereich existieren bereits unterschiedliche Systeme (Lasertracker, Laserscanner etc.), die sich in Industrie und Wirtschaft durchgesetzt haben. Diese werden im Folgenden nicht weiter betrachtet.

In dieser Arbeit liegt der Fokus auf approximativen Systemen im Innenbereich. Diese sind i. d. R. für Anwendungen gedacht, die es einem großen Nutzerkreis ermöglichen, ihre aktuelle Position in kurzer Zeit (nach eigenem Ermessen festgelegt auf  $< 10$  sek) zu bestimmen. Dabei ist neben einer Positionsgenauigkeit von unter 1 m im Innenbereich die Zuverlässigkeit des Positionierungssystems sehr wichtig. Ein approximatives IPS muss einer Person ermöglichen, ihren Standort innerhalb eines Gebäudes jederzeit zu bestimmen. Darüber hinaus sollen weitere Informationen, die mit der aktuellen Position verknüpft sind (z. B. Informationen zu einem Gemälde in einem Museum) am aktuellen Standpunkt abrufbar sein. Im Gegensatz zu präzisen Systemen soll die Positionsbestimmung möglichst kostengünstig erfolgen. Somit ist anzustreben, ein approximatives IPS mit Sensoren zu entwickeln, die der Nutzer ohnehin mit sich führt.



### 1.2 Mobile Endgeräte für approximative IPS

Für die Entwicklung von Low-Cost IPS werden meist Smartphones genutzt. Die Popularität von Mobiltelefonen ist in den letzten Jahren rasant angestiegen. Laut einer Studie des *Bundesverband Informationswirtschaft, Telekommunikation und neue Medien e.V.* (BITKOM) ist die Zahl der Handy-Nutzer im Jahr 2009 weltweit auf rund 4,4 Milliarden angewachsen (BITKOM, 2010), d. h. rein rechnerisch besitzen derzeit etwa zwei Drittel der Weltbevölkerung ein Mobiltelefon. Die Infrastruktur für Mobiltelefone sowie ihre Funktionalität werden stetig verbessert (Mobilfunkmasten, Sprachqualität etc.) und ihre Ausstattung vergrößert (siehe Abbildung 1.2).



Abbildung 1.2: Entwicklung von Mobiltelefonen bis 2009, Quelle: Schmitt (2009)

Mittlerweile bieten diese mobilen Endgeräte neben der Telefonfunktion viele weitere Optionen. Die Ausstattung von Mobiltelefonen - die heute durch ihre vielfältige Nutzung auch Smartphones genannt werden (Roth, 2002) - reicht von Unterhaltungsmedien wie MP3-Player und Radio über Applikationen zum Datentransfer wie Bluetooth, WLAN, *Universal Mobile Telecommunications System* (UMTS) etc. bis hin zu Sensoren wie *Global Positioning System* (GPS) - Sensoren, Beschleunigungssensoren und digitalen Kameras. Je größer der Speicherbedarf durch die Vielzahl neuer Anwendungen wird, umso mehr Speicherkapazität benötigen die Smartphones. Bei einigen aktuellen Produkten stehen daher bis zu 32 GByte zur Verfügung. Die stetige Weiterentwicklung kann jedes Jahr auf Fachmessen wie dem World Mobile Congress oder der CeBit verfolgt werden. Hier werden die neuesten Entwicklungen an Applikationen und Sensoren vorgestellt.

Die integrierten Funktionalitäten wie WLAN-Module, Beschleunigungssensoren, digitaler Kompass oder Digitalkamera können zur Erfassung von Messdaten für ein IPS genutzt werden.

### 1.3 Zusammenfassung Motivation

Potentielle Einsatzbereiche für das IPS sind Gebäudeinformationssysteme sowie Anwendungen im Bereich der Baufortschrittsdokumentation und des Facility Managements. Im Bereich der Personenortung finden sich im Bereich approximativer Systeme mehrere Sensoren, welche die Genauigkeitsanforderung von  $< 1$  m erfüllen. Genauigkeiten im Bereich weniger cm, wie sie z. B. bei der Baufortschrittsdokumentation gefordert werden, lassen sich jedoch nur mit Sensoren, wie sie in präzisen Systemen vorzufinden sind, realisieren. Optische Sensoren sind die einzigen, die im Bereich der Indoor-Positionierung sowohl in approximativen als auch in präzisen Systemen genutzt werden.

Außerdem muss das IPS eine permanente und zuverlässige Positionsbestimmung ermöglichen. Daher kann hier nur ein infrastrukturegebundenes System zum Einsatz kommen, wobei die Infrastruktur ebenfalls permanent vorliegen muss. Für die meisten Gebäude existieren detaillierte CAD-Modelle, die das Bauwerk weitestgehend vollständig beschreiben (Innenwände, Türen, Fenster etc.). Diese Modelle können beim Einsatz von optischen Sensoren als Referenzsystem genutzt werden. Der Einrichtungsaufwand der Infrastruktur über das Anbringen visueller Marken und Referenzierung mit dem entsprechenden CAD-Modell ist relativ gering.

Ein weiteres Kriterium für ein praxisgerechtes IPS ist dessen Massentauglichkeit. Damit ist gemeint, dass ein möglichst großer Nutzerkreis die Sensoren, die in aktuellen Smartphones integriert sind, zur eigenen Positionsbestimmung nutzen kann und kein zusätzliches Messsystem erwerben muss. Die Auflösung in Handykameras ist innerhalb kurzer Zeit (von 2002 bis heute) von 0,2 Mpx (Nokia 7650) bis 8 Mpx (LG Renoir KC910) angewachsen. Somit hat sich in den letzten Jahren bei vergleichsweise mäßig steigenden Kosten sowohl die Bildqualität als auch die Stabilität von kostengünstigen Digitalkameras enorm verbessert, so dass eine höherwertige Positionierung auch mit modernen Smartphone-Kameras denkbar ist.

Im Hinblick auf die genannten Kriterien, stellt sich ein bildbasiertes Sensorsystem als am besten geeigneter Kandidat zur Indoorpositionierung heraus. Daher ist es Ziel meiner Arbeit, ein kostengünstiges, OIPS zu entwickeln, sein Genauigkeitspotential zu untersuchen sowie seine Zuverlässigkeit zu testen. Aus den Ergebnissen kann dann die Eignung des Systems für die genannten Einsatzbereiche abgeleitet werden.

## 2 Stand der Wissenschaft

Im Folgenden werden die unterschiedlichen Verfahren erläutert, die für infrastrukturegebundene IPS eingesetzt werden. Da autonome Systeme noch keine absolute Positionsbestimmung innerhalb von Gebäuden ermöglichen, werden sie im Folgenden nicht weiter diskutiert. Ebenso werden bereits erwähnte Messsysteme für präzise IPS, wie Lasertracker, Messkameras etc. nicht weiter berücksichtigt, da ihr Einsatzgebiet sehr speziell ist und sie kein Low-Cost - IPS darstellen. Stattdessen werden hauptsächlich Sensoren approximativer Systeme im Zusammenhang mit den vorgestellten infrastrukturegebundenen Verfahren betrachtet.

Die Referenzen zur Umgebung, die infrastrukturegebundene Systeme benötigen, werden mit *Referenzstation* (R), *Bake* oder *Accesspoint* (AP) bezeichnet. Die *Mobilstation*, auch *Client* genannt, bzw. ihre Position werden mit M bzw.  $P_0$  abgekürzt.

Am Ende dieses Kapitels werden die Eigenschaften der vorgestellten Verfahren in Tabelle 2.4.2 noch einmal gegenübergestellt.

### 2.1 Näherungsbasierte Verfahren

Einfache Verfahren der Positionierung sind durch *näherungsbasierte* Verfahren gegeben. Dabei erkennen aktive, stationäre Sensoren  $R_i$  ( $i$ =Nummer der Referenzstation) mit bekannten Positionen, ob eine Mobilstation in Reichweite, d. h. in ihrem Sendebereich ist und melden diese Information an eine zentrale Instanz, z. B. einen Serverrechner. Sind die Referenzstationen passiv, muss die Information, welche Referenzstation erreichbar ist, von der Mobilstation aus an den Server geschickt werden. Die Positionen der  $R_i$  sind bekannt und liegen ebenfalls auf dem Server. Somit ist bekannt, in welchem Referenzbereich die Mobilstation zu finden ist. Befindet sich die Mobilstation in Reichweite mehrerer Referenzstationen, kann die Positionsbestimmung noch verbessert werden, da sich M nur noch in den Überlappungsbereichen der Referenzstationen befinden kann (siehe Abbildung 2.1). Diese Art der näherungsbasierten Verfahren wird auch *Annäherungsprinzip* genannt. Beim Annäherungsprinzip werden unterschiedliche Arten von Referenzstationen eingesetzt. Als passive Referenzen bieten sich z. B. (RFID)- Transponder an. Aktive Referenzen können z. B. über aktive RFID-Transponder, WLAN-Access Points oder Mobilfunkmasten realisiert werden. Sie können die Mobilstation in ihrem Bereich erkennen und melden. Dies erlaubt je nach Reichweite eine Positionsbestimmung im Umkreis von 10 bis 50 m in Gebäuden und ca. 300 m im Freien. Die Genauigkeit ist jedoch stark abhängig von der Umgebung und der Anzahl der Referenzstationen. *Global Systems for Mobile Communications* (GSM) werden von vielen Netzbetreibern zur groben Positionsbestimmung genutzt. Die Genauigkeit ist abhängig von der Größe der Funkzelle, welche bei Mobilfunknetzen von 1 km in Ballungszentren bis hin zu 35 km auf dem Land variieren kann (Roth, 2002). Außerdem wird die Position nur lagemäßig bestimmt, die Höhe kann nicht ermittelt werden. Positiv beim

Annäherungsprinzip ist jedoch, dass, abgesehen vom Mehraufwand bei der Installation von genügend Referenzen, keine besonderen Änderungen an der Hard- und Firmware vorgenommen werden müssen und auch keine aufwendige Softwareinstallation beim Empfänger notwendig ist.

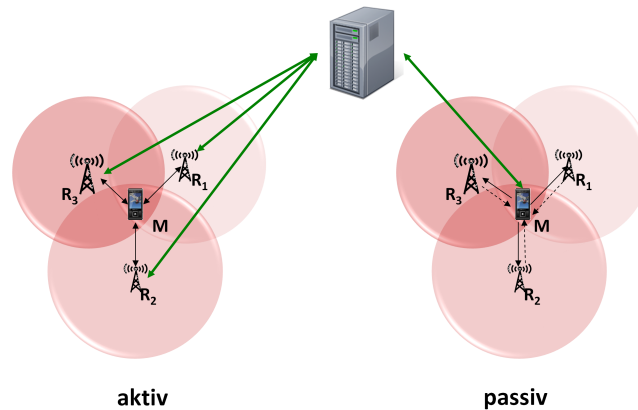


Abbildung 2.1: Annäherungsprinzip

Für Indoorapplikationen wurde auch versucht, mit anderen Sensoren die Position der Mobilstation durch physischen Kontakt, etwa durch Drucksensoren im Boden (z.B. Smart Floor), Türkontakten oder Wärmesensoren zu ermitteln. Diese erlauben bei entsprechend hoher Dichte eine sehr genaue Positionsbestimmung, bieten aber im Allgemeinen keine Möglichkeit zwischen einzelnen Mobilstationen dauerhaft zu unterscheiden. Ein weiterer Nachteil solcher Systeme sind die mitunter extrem hohen Kosten für die Installation.

Systeme, die auf dem Annäherungsprinzip basieren, sind u. a. das auf Infrarot-Baken basierende *Active Badge System* (Hopper et al., 1993), *WIPS* (basierend auf Infrarot-Baken, Kommunikation über WLAN) (Kitasuka et al., 2003), *SpotON* (Hightower et al., 2000) oder RFID (Roth, 2002).

## 2.2 Szenenanalyse-Verfahren

Bei der Szenenanalyse wird die Umgebung vor der eigentlichen Positionsbestimmung erfasst. Die Art der Analyse ist dabei abhängig von der Art der Positionsermittlung. Die Szenendaten können durch Signalstärkemessungen von örtlich vorhandenen Referenzstationen, durch Kameraaufnahmen oder klassische Vermessungsverfahren gewonnen werden.

### 2.2.1 Signalstärkemessungen

Die Szene kann durch die vorhandene Signalstärke der Referenzstationen modelliert werden. Sie kann einerseits theoretisch aus einem gegebenen Gebäudeplan mit Angabe der vorhandenen Referenzstationen abgeleitet (*Signalstärkemodellierung*) oder durch empirische Messungen festgelegt werden (*Fingerprint-Verfahren*).

**Modellierung der Szene durch die Signalstärke:** Hierbei wird die Ausbreitung der Funkwellen der Referenzstationen in dem Szenario modelliert, in dem später die Positionierung erfolgen soll. Zusätzlich müssen feststehende Gegenstände wie Wände etc. eingemessen werden oder ihre Lage aus einem bereits existierenden Gebäudemodell entnommen werden. In dieser sogenannten *Offline*-Phase wird für jeden gewünschten Punkt der Szene die Signalstärke unter Berücksichtigung der eingemessenen Objekte (bzw. des Modells) ermittelt. In der Regel wird bereits in der Offline-Phase ein Punktraster erzeugt und die berechneten Signalstärkewerte in einer Datenbank gespeichert. In der Online-Phase werden die gemessenen Signalstärken mit denen in der Datenbank verglichen und durch Korrelation die am besten zusammenpassende Signalstärke aus Messung und Datenbank ermittelt. Die Koordinaten mit dem Korrelationsmaximum entsprechen der Position der Mobilstation. Die momentan erreichbare Genauigkeit liegt bei 5-10 m, je nachdem, wie gut die Szene modelliert werden kann.

**Fingerprinting:** Beim Fingerprinting werden in der *Offline*-Phase an verschiedenen rasterförmig angeordneten Gitterpunkten (Referenzpunkten) des abzudeckenden Gebietes Messungen, z. B. der Signalstärke ( $S_{AP_i}$ ) von vorliegenden Basisstationen (Access-Points,  $AP_i$ ), vorgenommen und in einer Referenzdatenbank abgelegt (Abbildung 2.2). Zur Bestimmung der aktuellen Position eines Objektes werden die aktuell gemessenen Signalstärkemesswerte der Mobilstation mit den Referenzwerten innerhalb der Datenbank verglichen. Bei der Erfassung der Vergleichsdatensätze müssen Einflussfaktoren auf die elektromagnetischen Wellen, wie z. B. die Mehrwegeausbreitung bei Funkwellen innerhalb von Gebäuden, berücksichtigt werden. Dies kann entweder durch Mittelung von Mehrfachmessungen oder durch die Anwendung von statistischen Verfahren vor der Speicherung geschehen (Jehl, 2007). Die Genauigkeit beträgt 1-3 m, je nachdem, wie dicht das Referenzgitter vorliegt. Untersuchungen zur Anlage eines Referenzgitters für das Fingerprint-Verfahren werden in Kaemarungsi & Krishnamurthy (2004) vorgestellt.

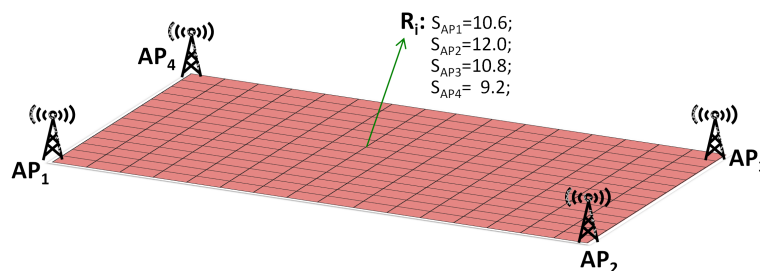


Abbildung 2.2: Fingerprint-Verfahren

Vorteil der auf Signalstärkemessungen basierten Verfahren ist die einfache und schnelle Bestimmung der Position in der *Online*-Phase. Die Genauigkeit ist für einfache Navigationszwecke in den meisten Fällen ausreichend. Allerdings gestaltet sich sowohl die Modellierung der Szene und die Kalibrierung des Systems als auch der Aufbau der Datenbank in der *Offline*-Phase als sehr aufwändig. Außerdem reicht eine einmalige Modellierung und Kalibrierung nicht aus, da sich sowohl die Szene als auch die Signalstärke mit der Zeit verändern können.

Meist werden signalstärkebasierte Verfahren bei der Positionierung mittels WLAN eingesetzt, z. B. bei Gallagher et al. (2010), Ekahau (2011) oder Skyhook (2011).

### 2.2.2 Optische Szenenanalyse

Bei der optischen Szenenanalyse visiert der Client statische Objekte mit bekannter Position an. Die Blickrichtung auf ein georeferenziertes Objekt kann durch Entzerrung der Aufnahme berechnet werden. Dadurch kann der Client auf seine momentane Position schließen. Die Objekte werden anhand von Mustererkennungsalgorithmen im Bild detektiert. Ihre Positionen müssen in einer Datenbank hinterlegt sein und der Client muss die Möglichkeit haben, diese Datenbank abzufragen, um seine Position bestimmen zu können. Als optische Referenz können auch charakteristische Merkmale von Positionen, in Gebäuden zum Beispiel an Türen stehende Raumnummern eingesetzt werden. In diesem Falle kann die Position auch ohne zusätzliche Berechnungen näherungsweise bestimmt werden, z. B. durch die Angabe, vor welchem Raum sich eine Person befindet.

Systeme, die optische Szenenanalyse nutzen, werden hauptsächlich in der Roboternavigation eingesetzt. Ein aktuelles Forschungsgebiet in diesem Zusammenhang ist das *Simultaneous Localization and Mapping* (SLAM). Hierbei wird versucht, durch iterative Erfassung der Umgebung anhand von Kameraaufnahmen oder Laserscanning, die Umgebung bestmöglichst zu erfassen und abzuspeichern. Schon bei der Aufzeichnung der Umgebung ist es möglich, die Position des Roboters relativ zu der aufgezeichneten Umgebung mitanzugeben.

Veröffentlichungen in diesem Bereich sind unter anderem Hochdorfer & Schlegel (2010) oder Khoshelham (2010). Hochdorfer & Schlegel (2010) geben für ihr Testfeld eine absolute Positionsabweichung  $< 0,5\text{ m}$  an.

## 2.3 Distanzbasierte Verfahren

Moderne Messverfahren ermöglichen eine Streckenbestimmung zwischen Mobil- und Referenzstationen mit cm-Genauigkeit. Daher lassen sich auch bei der Indoorpositionierung Verfahren nutzen, mit denen direkt aus den Distanzmessungen eine Positionsbestimmung mit einer Genauigkeit von wenigen cm abgeleitet werden kann.

### 2.3.1 Lateration

Das wohl bekannteste Verfahren hierbei ist das *Laterationsprinzip*, in der Geodäsie auch räumlicher Bogenschnitt genannt. Zur Bestimmung der Lösung des räumlichen Bogenschnitts existieren verschiedene Verfahren, wie z. B. der von Rinner vorgestellte Algorithmus in Jordan et al. (1966), ein Verfahren nach Singer et al. (1993) oder ein auf linearer Algebra basierender Ansatz von Norrdine (2008). Alle Ansätze

basieren auf dem Zusammenhang zwischen Mobilstation M und Referenzstation R über die euklidische Distanz:

$$d_{M,R} = \sqrt{(x_R - x_M)^2 + (y_R - y_M)^2 + (z_R - z_M)^2}, \quad (2.1)$$

mit

$(x_M, y_M, z_M)$  = Position der Mobilstation bzw. des Neupunktes,

$(x_R, y_R, z_R)$  = Position der Referenzstation R,

$d_{MR}$  = Raumstrecke zwischen M und R.

Aus diesem Zusammenhang lässt sich die Position der Mobilstation durch die Streckenmessung zu mindestens drei Referenzstationen mit bekannten Koordinaten bestimmen. Das Laterationsverfahren wird in präzisen Positionierungssystemen eingesetzt, die durch Senden und Empfangen von Ultraschall- oder Funksignalen die euklidische Distanz zwischen Mobil- und Referenzstation mit einer Genauigkeit bis zu 1-2 cm bestimmen können. Dadurch kann die Position mit Genauigkeiten im cm-Bereich bestimmt werden. Allerdings ist der Einrichtungsaufwand der Referenzstationen entsprechend hoch. Sie müssen im Vorfeld über alternative Messverfahren (z. B. Tachymetrie) eingemessen werden.

Beispiele laterationsbasierter Systeme sind das an der Cambridge Universität entwickelte System *Active Bat* (Abbildung 2.3), das Indoor-Positionierungssystem Cricket (Priyantha, 2005), ebenfalls basierend auf Ultraschallsignalen und Radiofrequenzen oder ein an der TU Darmstadt entwickeltes *Ultra Wide Band* (UWB)-Positionierungssystem (Blankenbach et al., 2007; Norrdine, 2009). Mit den Systemen können Positionen auf 1-2 cm genau bestimmt werden, allerdings unter den Prämissen, dass genügend und gut verteilte Referenzstationen angebracht sind und keine Laufzeitverzögerungen auftreten, welche nicht modelliert werden können.

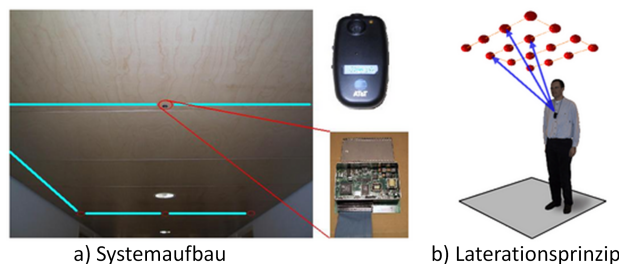


Abbildung 2.3: Active Bat System, Quelle: Bat-System (2002)

#### 2.3.2 Hyperbelschnittverfahren

Eine auf denselben Eingangsgrößen wie die Lateration beruhende Methode ist das *Hyperbelschnittverfahren*. Allerdings werden hier nicht direkt die gemessenen Strecken, sondern Streckendifferenzen zur Berechnung der Position genutzt. Der Zusammenhang zwischen Mobilstation M und Referenzstationen R ist in (2.2)

gegeben.

$$d_i = \frac{s_{M,R_i} - s_{M,R_0}}{\sqrt{(x_{R_i} - x_M)^2 + (y_{R_i} - y_M)^2 + (z_{R_i} - z_M)^2} - \sqrt{(x_{R_0} - x_M)^2 + (y_{R_0} - y_M)^2 + (z_{R_0} - z_M)^2}} \quad (2.2)$$

Von einer ausgewählten Referenzstation  $R_0$  ausgehend wird die Strecke zur Mobilstation M als Referenzstrecke  $s_{M,R_0}$  angenommen und diese von den anderen Strecken  $s_{M,R_i}$  subtrahiert, so dass die Differenzen  $d_i$  als neue funktionale Größen vorliegen. Allerdings müssen hier im Gegensatz zum Laterationsverfahren mindestens vier Strecken bekannt sein, da mit der Differenz  $d_i$  eine Unbekannte hinzukommt. Das angewendete Verfahren hierfür ist der räumliche Hyperbelschnitt. Gleichung (2.2) beschreibt die Schale eines rotationssymmetrischen Hyperboloides. Mit vier Festpunkten können drei Hyperboloide beschrieben werden. Ihr Schnittpunkt liefert den gesuchten Neupunkt. Ein nicht-iterativer Lösungsansatz für den räumlichen Hyperbelschnitt wird in Kleusberg (1994) beschrieben. Das Hyperbelschnittverfahren wird erfolgreich im GPS-Bereich eingesetzt, um Uhrenfehler, welche die Strecken  $s_{M,R_i}$  verfälschen, mit zu berücksichtigen. Im Indoor-Bereich konnte sich dieses Verfahren allerdings nicht durchsetzen, da hier die Fehler in den Distanzen nicht notwendigerweise gleich groß sind.

Distanzbasierte Verfahren sind die Grundlage für alle GNSS-Positionierungssysteme im Außenbereich. Analog zur GNSS-Technologie werden im Innenbereich zur Positionsbestimmung sogenannte *Pseudolites* verwendet. Die Pseudolites-Referenzstationen werden verteilt um den Messraum angebracht und senden satellitenähnliche Signale. Wie bei GNSS kann anhand des Hyperbelschnittverfahrens die Position einer Mobilstation innerhalb des Gebäudes bestimmt werden.

Das in Rizos & Barnes (2010) entwickelte System *Locata* basiert auf derartigen Pseudolites. In Tests wurden mit dem System bei kinematischem Einsatz teilweise Genauigkeiten  $< 20$  cm erreicht.

## 2.4 Winkelbasierte Verfahren

Neben den distanzbasierten Verfahren besteht auch die Möglichkeit, mit Winkelmessungen eine Positionsbestimmung durchzuführen. Die Verfahren werden unter dem Begriff *winkelbasiert* zusammengefasst, da die Position nicht ausschließlich durch Winkelmessungen bestimmt werden kann. Man benötigt immer noch eine Referenzstrecke, um den Maßstab festzulegen.

### 2.4.1 Triangulation

Beim *Triangulationsverfahren*, in der Geodäsie auch räumlicher Vorwärtsschnitt genannt, werden die Innenwinkel in den Dreiecken, die von jeweils zwei Referenzstationen und der Mobilstation aufgespannt werden, gemessen und mit einer zusätzlichen festen Distanz als Maßstab oder Basis die Position bestimmt. Als feste Station dient ein Antennenarray. Abbildung 2.4-a zeigt zwei nebeneinanderliegende Antennenelemente  $S_1$  und  $S_2$ .

Der Eingangswinkel  $\alpha$  kann über die Laufzeitdifferenz einer in den beiden Sensoren  $S_1$  und  $S_2$  auftreffenden Welle und der Bezugsrichtung durch die Normale zur Basislinie  $b$  ermittelt werden (Ingensand & Bitzi,



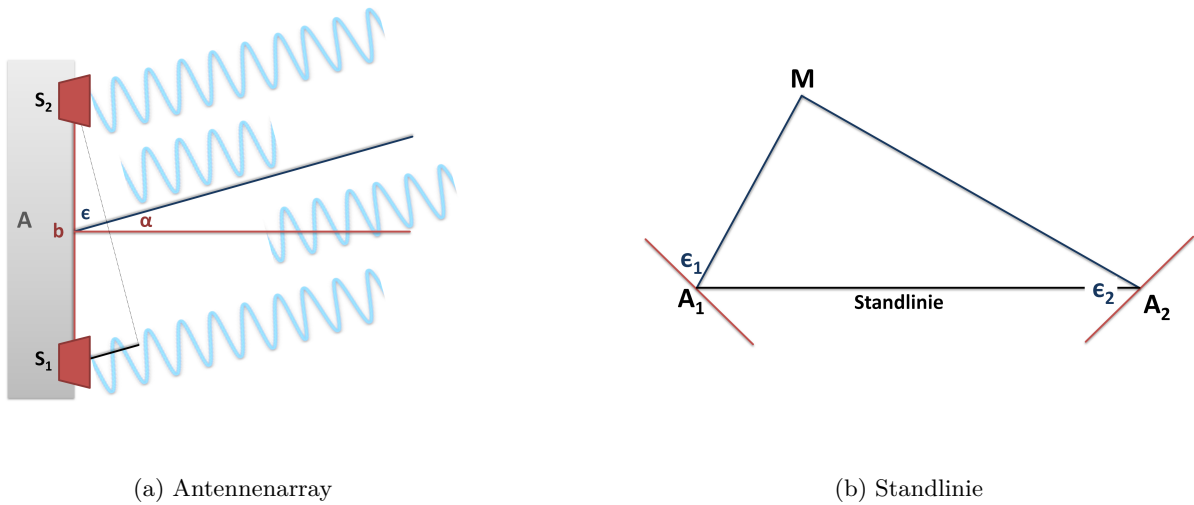


Abbildung 2.4: Triangulationsprinzip

2001). Für eine zweidimensionale Positionsbestimmung werden mindestens zwei feste Stationen bzw. Antennenarrays benötigt, von denen aus die Eingangswinkel  $\epsilon_i$  zum Neupunkt M bestimmt werden (Abbildung 2.4-b). Die beiden Arrays müssen zueinander orientiert und der Abstand  $b$  zwischen ihnen bekannt sein. Die Berechnung der Neupunktlage erfolgt anschließend über das Triangulationsverfahren. Für eine dreidimensionale Positionsbestimmung müssen die Antennenarrays zusätzlich zur horizontalen eine vertikale Komponente aufweisen (Matrix-Array). Dadurch können der Höhenwinkel und somit die Z-Koordinate mitbestimmt werden.

In Kombination mit weiteren Verfahren wird die Triangulation z. B. bei UbiSense (2005) oder in dem von Nikon entwickelten *iGPS*-Messsystem eingesetzt (Schwendemann et al., 2010). Die Triangulation ist auch die Grundlage für Optical Tracking Systeme, bei denen fest stationierte Kameras im Raum verteilt werden. Ihre Orientierung zueinander ist bekannt. Durch gleichzeitige Aufnahme eines mit Referenzmarken bestückten Objektes kann seine Position in dem System der Kameras bestimmt werden. Eingesetzt werden solche Trackingsysteme z. B. zur Aufzeichnung und Analyse menschlicher Bewegungen (Qualysis, 2011).

### 2.4.2 Räumlicher Rückwärtsschnitt

Ein variableres Verfahren als die Triangulation bietet der *Räumliche Rückwärtsschnitt* (RWS). Ausgegangen wird hier von zunächst drei Referenzpunkten, die, wie auch beim räumlichen Bogenschnitt, mit der Mobilstation ein Tetraeder aufspannen (vgl. Abbildung 2.5). Im Gegensatz zum räumlichen Bogenschnitt werden beim räumlichen Rückwärtsschnitt jedoch nicht die Distanzen zwischen  $R_i$  und  $P_0$  gemessen, sondern die Winkel an der Tetraederspitze ( $\alpha, \beta, \gamma$ ). Anhand der gemessenen Innenwinkel und der koordinatenmäßig bekannten Referenzpunkte werden die übrigen Bestimmungselemente des Tetraeders bestimmt, aus denen letztlich die Position  $P_0$  abgeleitet wird.

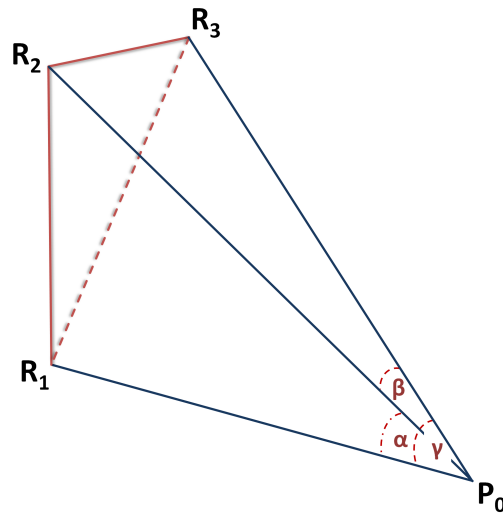


Abbildung 2.5: Prinzipskizze zum räumlichen Rückwärtsschnitt

Es gibt unterschiedliche Ansätze, um zu einer Lösung des räumlichen Rückwärtsschnitts zu gelangen. Diese werden in Kapitel 4 detailliert beschrieben, da die RWS-Methode die Basis zur Positionsbestimmung in der vorliegenden Arbeit bildet. Eingesetzt wird das Verfahren hauptsächlich in der Nahbereichsphotogrammetrie zur Bestimmung von Näherungslösungen.

Als Grundlage der Bündelblockausgleichung wird der *Räumliche Rückwärtsschnitt* bei Industriemesssystemen eingesetzt, die Positionen im sub-mm-Bereich bestimmen können (Aicon, 2011). Auch im Bereich der Low-Cost-Indoor-Positionierungssysteme werden optische Systeme eingesetzt, deren Auswertemethode auf dem Verfahren des Räumlichen Rückwärtsschnitts beruht. Bei ausreichender Information aus der Infrastruktur können auch hier Positionsergebnisse im Bereich weniger dm erreicht werden (Hile & Boriello, 2008).

## 2.5 Optische Systeme

Da sich diese Arbeit auf ein optisches System zur Indoorpositionierung konzentriert, wird im Folgenden der aktuelle Stand *Optischer Indoorpositionierungssysteme* (OIPS) nochmals detailliert aufgezeigt. Mit OIPS sind dabei ausschließlich kamerabasierte Systeme gemeint. Die Aufteilung erfolgt nach Verfahrensweise und Anwendungsgebiet.

Präzise OIPS basieren auf geometrischer Positionsbestimmung. Wie bereits erwähnt, werden diese Systeme meist in der Industrie zur Objektvermessung eingesetzt. Systeme in diesem Bereich sind z. B. das Messsystem ProCam der Firma Aicon (Aicon, 2011) oder das in Mautz & Tilch (2010) vorgestellte *Camera and Laser Indoor Positioning System* (CLIPS). Beide Systeme nutzen ein Festpunktfeld, das entweder im Vorfeld eingemessen worden ist oder durch Laserpunkte, die zum Zeitpunkt der Messung auf die Umgebung projiziert werden, gegeben ist. Eine mit Tastspitze ausgestattete Messkamera kann durch Aufnahme des Festpunktfeldes relativ dazu orientiert und dadurch ein Objekt mit der Tastspitze in

einem Punktraster aufgemessen werden. Mit diesen Systemen können Genauigkeiten  $< 1$  cm erzielt werden. Allerdings kann mit ihnen zunächst nur eine lokale Positionierung realisiert werden. Desweiteren sind sie durch ihr spezielles Equipment (hochwertige Kamera, Messkammer oder Laserigel) auch nur für spezielle Anwendungen ausgelegt.

Auch das kommerziell vertriebene System Sky-Trax (2009) leitet die Position aus einem Bild geometrisch ab. Dabei wird ein Festpunktfeld aufgenommen, das durch an der Decke angebrachte, codierte Zielmarken realisiert wird. Das System wird in großen Lagerhallen eingesetzt, um die Position von Gabelstaplern zu bestimmen. Dabei werden die codierten Zielmarken eingemessen und die Gabelstapler auf dem Dach mit einer Kamera versehen. Dadurch kann ein großer Bereich zur Positionsbestimmung bei einmaligem Einrichtungsaufwand abgedeckt werden. Aufgrund der geringeren Qualität der Messkameras sowie der Zielmarken, beschränkt sich die Positionsgenauigkeit in diesem Fall auf 2-30 cm. Noch weiter reduziert werden kann der Aufwand, wenn nur aus einer Zielmarke die Position abgeleitet wird (Mulloni et al., 2009). Hier werden die codierten Marken nur an dezidierten Stellen in einem Gebäude angebracht und ihre Position sowie Orientierung im Code hinterlegt. Durch Fotografieren der Marke mit einer Smartphone-Kamera kann ihre Position ermittelt werden. Relativ zu der Marke kann auch hier eine Genauigkeit  $\leq 1$  dm erreicht werden. Die absolute Genauigkeit hängt von der Genauigkeit der Einrichtung der Zielmarke ab. Der Bereich, in dem der Nutzer sich positionieren kann, ist eingeschränkt, da die Zielmarke in unmittelbarer Nähe aufgenommen werden muss.

Ein OIPS, das ohne Zielmarken arbeitet und seine Position aus natürlichen Landmarken ableitet, wird u. a. in Hile & Boriello (2008) vorgestellt. Dabei werden die Merkmale, wie Raumecken, Türkanten etc. (natürliche Landmarken) in einem aktuell aufgenommenen Bild extrahiert und mit dem a priori vorhandenen Gebäudeplan verglichen. Das Bild wird auf den Teil des Gebäudeplans, mit dem es am besten korrespondiert, abgebildet und dadurch die Position der Kamera bestimmt. Für die Aufnahmen genügt hier, wie im Fall von Mulloni et al. (2009), eine Smartphone-Kamera. Die Genauigkeit, die mit diesem System erreicht wird, liegt im dm-Bereich.

In Werner et al. (2011) wird ebenfalls ein OIPS vorgestellt, das ohne Zielmarken aus Einzelbildern einer Smartphone-Kamera die Position ableitet. Anstelle des Gebäudeplans ist die Grundlage hier eine Bilddatenbank mit Referenzbildern des Gebäudes, die von einer bekannten Position mit bekannter Orientierung aufgenommen worden sind. Durch Anwendung von SIFT- und SURF-Algorithmen (Lowe, 1999; Bay et al., 2008) werden in allen Aufnahmen die auffälligsten Merkmale extrahiert. Die aktuelle Aufnahme wird nun mit allen Referenzbildern verglichen, indem die euklidischen Distanzen zwischen den Merkmalen in jedem Referenz- und dem aktuellen Bild berechnet werden. Das Referenzbild mit den kleinsten euklidischen Distanzen liefert die erste Näherung zur Positionsangabe. Über das Verhältnis des Abstandes zweier Merkmale im Referenzbild und den korrespondierenden Merkmalen in der aktuellen Aufnahme wird der Abstand zwischen den beiden Aufnahmen geschätzt und dadurch die Position genauer bestimmt. In Testmessungen lag der Median der Positionsabweichungen zwischen 1-2 m.

Verfahren	Methoden	Sensoren	Reichweite <sup>a</sup>	LoS	NLoS	Genauigkeit	Dim.
Näherung	Cell Of Origin	RFID	≤ 12 m	✓	✓	≥ 0,5 m	2D
		WLAN	≤ 40 m	✓	✓	≥ 1,5 m	2D
		Druck-/ Wärmesensoren Infrarotbaken	0 m	-	-	≥ 0,5 m	2D
Szenenanalyse	Signalstärke Fingerprinting Optisch	WLAN	≤ 40 m	✓	✓	5-10 m	2D
		WLAN	≤ 40 m	✓	✓	1-3 m	2D
		Kamera	≤ 8 m	✓	-	wenige dm	3D
Distanzbasiert	Trilateration	Ultraschall UWB	≤ 6 m ≤ 30 m	✓ ✓	- ✓	1-2 cm 1-3 cm	3D 3D
	Hyperbelschnitt	Pseudolites	-	✓	-	wenige cm	3D
Winkelbasiert	Angle Of Arrival  Rückwärtsschnitt	iGPS	2-50 m	✓	-	0,1 mm	3D
		UWB	Raumweite	✓	-	1-3 cm	3D
		Kamera Kamera	Raumweite Raumweite	✓ ✓	- -	≤ 1 cm ≤ 1 mm	3D 3D

Tabelle 2.1: Eigenschaften infrastrukturgebundener Verfahren zur *Indoorpositionierung*

<sup>a</sup>Reichweite in Minimalanordnung d. h. minimale Anzahl an Referenzstationen, die benötigt wird, um eine Position zu ermitteln

### 3 Konzeptionierung eines OIPS

Neben der möglichst genauen (durch die Applikation vorgegebenen) Positionsbestimmung sollen IPS auch kostengünstig sein. Abbildung 3.1 skizziert das Verhältnis von Kosten und Genauigkeit verschiedener IPS. Es wird deutlich, dass die Genauigkeit der Positionierungssysteme stark abhängig ist von ihren Kosten. Alle Systeme zeigen eine starke Korrelation zwischen den Parametern Genauigkeit und Kosten.

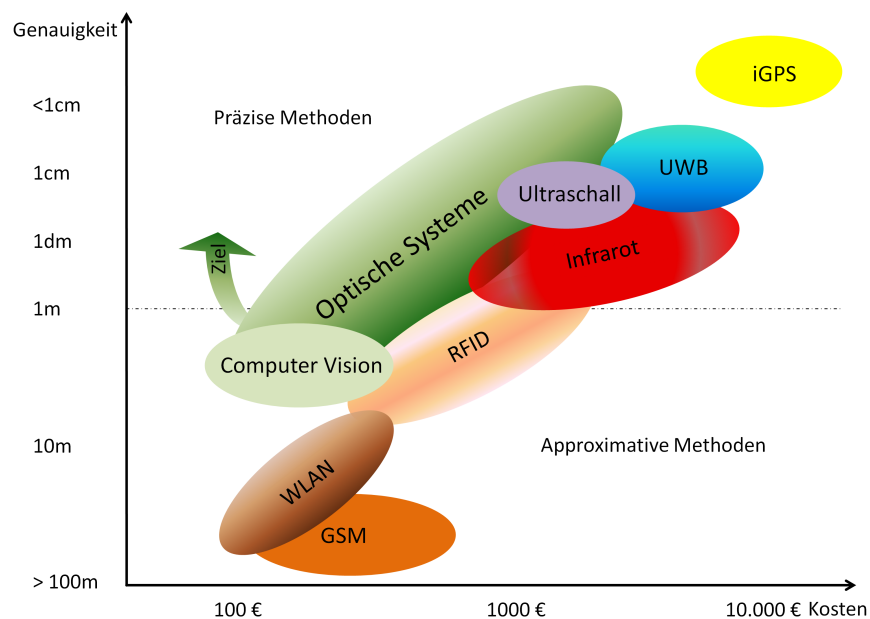


Abbildung 3.1: Gegenüberstellung von Kosten und Genauigkeit verschiedener IPS

IPS, die auf *Infrarot*, RFID oder *Ultraschall* basieren, scheinen neben OIPS ebenfalls einen guten Kompromiss zwischen den beiden Faktoren Kosten und Genauigkeit zu liefern. Allerdings sind die dazu notwendigen Sensoren derzeit noch nicht standardmäßig in Smartphones integriert. Außerdem ist die Reichweite dieser Sensoren begrenzt (vgl. Tabelle 2.4.2). Um ein effizientes System mit ihnen zu realisieren, müsste im Vorfeld eine entsprechend ausgestattete Infrastruktur mit relativ hohem Aufwand aufgebaut werden. WLAN basierte Systeme liefern ein kostengünstiges IPS, allerdings ist die zu erreichende Genauigkeit hier meist noch  $> 1\text{ m}$  und kann nur mit großem Aufwand verbessert werden.

Vergleicht man die Bandbreite der Genauigkeit sowie der Kosten der in Abbildung 3.1 dargestellten IPS, wird deutlich, dass Optische Indoorpositionierungssysteme einen sehr großen Bereich abdecken. Je nach Qualität des Messinstrumentariums - in diesem Falle der Optik einer Kamera - nimmt die Positionsgenauigkeit zu. Im Bereich approximativer Verfahren werden Low-Cost-Kameras, wie sie in Webcams oder

Smartphones zu finden sind, bereits verwendet. Die Qualität von Smartphonekameras war in früheren Gerätegenerationen noch nicht ausreichend, um sie wie eine Messkamera zumindest als approximative Positionierungssysteme einzusetzen. Doch, wie bereits in Kapitel 1 erwähnt, hat sich bei vergleichsweise mäßig steigenden Kosten sowohl die Bildqualität als auch die Stabilität von solchen hochintegrierten Kameras aus dem Bereich der Consumer-Elektronik enorm verbessert, so dass eine höherwertige Positionierung auch mit modernen Smartphone-Kameras denkbar ist.

Es gibt bereits OIPS, die Handykameras als Messsensoren nutzen (siehe Abschnitt 2.5). Welche Qualität die Handykamera aufweisen muss, um eine gute Positionslösung zu liefern, welche Positionsgenauigkeiten aktuell erreicht werden können und wie störanfällig diese Systeme gegenüber unterschiedlichen Lichtverhältnissen sind, geht aus den bisherigen Anwendungen nicht hervor.

Zielsetzung dieser Arbeit ist es daher, das Potenzial von OIPS, die mit einer Handykamera realisiert werden, in die Gruppe approximativer oder präziser Verfahren einzuordnen. Dies geschieht auf Basis von Genauigkeitsanalysen der einzelnen Einflussgrößen auf die Positionsgenauigkeit. Im ersten Schritt soll zunächst analysiert werden, ob sich Handykameras hinsichtlich ihres Genauigkeitspotenzials als optisches Positionierungssystem einer Person in einem Gebäude eignen können.

Weiterhin soll ein Prototyp für ein Handykamera basiertes OIPS realisiert werden. Mit dem Prototyp soll zum einen getestet werden, inwieweit die theoretischen Genauigkeitsabschätzungen in der Praxis verifiziert werden können bzw. wie genau die Position wirklich ermittelt werden kann. Zum anderen soll untersucht werden, wie zuverlässig die Position einer Person mit einer Handykamera mit der theoretisch abgeschätzten Genauigkeit ermittelt werden kann, auch wenn unterschiedliche Lichtverhältnisse vorliegen. Der Einrichtungsaufwand der Infrastruktur für ein OIPS ist recht gering, wenn sie durch Vorgabe eines CAD-Modells des Gebäudes schon vorhanden ist. Gegebenenfalls muss die Infrastruktur dann nur durch geringfügige Veränderungen (z. B. Markierung durch Zielmarken) erweitert werden. Somit sind die Aufwandskosten für die Einrichtung eines Handy-OIPS vergleichsweise niedrig. Auch die Kosten für den Nutzer sind meist gering, da moderne Handys bzw. Smartphones i. d. R. mit einer geeigneten Kamera ausgestattet sind und somit direkt als Messgerät genutzt werden können.

Wenn mit dem Handy-OIPS zuverlässig eine absolute Positionsabweichung  $< 1$  m erreicht wird, stellt es eine geeignete, kostengünstige Alternative zu bereits existierenden approximativen Wi-Fi- oder RFID-basierten IPS dar.

### 3.1 Anforderungsanalyse

Für ein approximatives Handy-OIPS müssen bestimmte Kriterien sowohl seitens der Hardware als auch der Software erfüllt sein. Eine Übersicht über potentielle mobile Endgeräte ist in Tabelle 3.3 gegeben.

#### 3.1.1 Anforderungen an den Client

Für die Aufnahme der Messdaten sowie zum Datenaustausch soll ein Smartphone genutzt werden. Dieses muss die im Folgenden aufgelisteten Kriterien erfüllen.

**Digitalkamera:** Zur Aufnahme eines codierten Musters muss eine Digitalkamera mit dauerhaft fixierbarer Brennweite im Smartphone integriert sein. Mit zunehmender Anzahl der Pixel auf dem Sensor einer Digitalkamera werden die Objekte im Bild mit einer höheren Auflösung dargestellt und können auch in einem größeren Abstand exakt detektiert werden (siehe Beispiel in Tabelle 3.1).

Sensorfläche [Mpx]	12	8	5	3	1
Bildgröße [px]	4	3	3	2	1

Tabelle 3.1: Bildgröße eines 1 cm großen Objektes, aufgenommen in einem Abstand von 10 m. Die Sensorfläche beträgt  $5,6 \times 4,2$  mm, die Brennweite  $f=6$  mm

Allerdings führt eine sehr große Pixelanzahl bei gleichbleibender Fläche des Bildsensors zu einem großen Bildrauschen, so dass die abgebildeten Objekte verschwommen erscheinen und nicht mehr exakt ermittelt werden können. Daher ist eine höhere Auflösung aufgrund von steigender Pixelanzahl bei gleichbleibender Sensorfläche nicht zwingend ein Kriterium für ein qualitativ hochwertiges Bild. Des weiteren muss beachtet werden, dass sowohl die Datenübertragung als auch die Auswertung eines Bildes mit zunehmender Pixelanzahl mehr Zeit in Anspruch nimmt.

Die Erfahrung hat gezeigt, dass eine 5 oder 8 Mpx-Kamera eine Positionierung auch bei einem größeren Abstand zum Objekt ( $\leq 9$  m) ermöglicht und die Dauer der Datenübertragung und Auswertedauer dabei in einem akzeptablen Zeitrahmen bleibt.

**Datendienste:** Die technische Entwicklung der Handygeräte ist in den letzten Jahren enorm vorangeschritten. Trotzdem reicht die Speicherkapazität eines Standardhandys noch nicht aus, um die komplette Positionsauswertung darauf durchzuführen. Somit müssen die Daten (Bildaufnahme) an einen Server geschickt werden, auf dem der Rechenprozess stattfindet. Zum Datentransfer ist eine weitere Voraussetzung, dass das Handy webfähig ist (Alby, 2008). Es gibt unterschiedliche Standards, die ein Kommunizieren mit der Umgebung über das Internet ermöglichen. In Tabelle 3.2 sind die theoretischen Übertragungsraten derzeit verbreiteter Standards aufgeführt. Um eine 1 MB große Bilddatei in möglichst kurzer Zeit ( $<5$ sec) zu übertragen, muss das Smartphone mindestens den Standard HSPA bzw. HSDPA zur Verfügung stellen. Für die Anwendung in OIPS muss allerdings berücksichtigt werden, dass die theoretischen Übertragungsraten in der Praxis kaum erreicht werden (Blankenbach, 2007).

**Applikationen:** Für das Senden des aufgenommenen Bildes an einen Server und das Empfangen der aus dem Bild berechneten Position muss eine native Applikation (Alby, 2008) auf dem Mobilgerät erstellt

Standard	Theoretische Übertragungsrate
Global System for Mobile Communications	9,6 kBit/s
General Packet Radio Service	13,4-53,6 kBit/s
Enhanced Data Rates for GSM Evolution	170 kBit/s
Universal Mobile Telecommunications System	384 kBit/s
High Speed Download Packet Access	14,4 MBit/s
High Speed Uplink Packet Access	5,8 MBit/s
Wireless Local Area Network	11-54 MBit/s

Tabelle 3.2: Standards zur Datenübertragung moderner Smartphones

werden. Der Grund dafür ist, dass Smartphones von unterschiedlichen Herstellern aktuell nicht immer das gleiche Betriebssystem unterstützen, siehe Tabelle 3.3.

Smartphone	iPhone 4	Sony Ericsson C905	Samsung Galaxy SII
			
Auflösung [px]	2048 × 1536	3264 × 2448	3264 × 2448
Focus	auto	auto/ inf	auto
Speicher [GB]	≤ 32	≤ 8	≤ 32
Daten-übertragung	GSM EDGE UMTS HSPA WLAN	GPRS EDGE UMTS HSDPA WLAN	GPRS EDGE UMTS HSPA WLAN
Betriebssystem	Mac OS X	Symbian	Android 3.2
Preis	519,- €	240,- €	420,- €

Tabelle 3.3: Geeignete Smartphones

Weiterhin unterscheiden sich auch die Versionen des Betriebssystems je nach Modell eines Smartphones. Durch die Vielfalt an Betriebssystemen und Versionen, ist es nicht ohne Modifikationen möglich, eine Anwendung universell für alle Mobilgeräte zu entwickeln. Eine massentaugliche Applikation muss daher in unterschiedlichen Ausführungen vorliegen, die auf die speziellen Betriebssysteme und Versionen der mobilen Endgeräte abgestimmt sind.



#### 3.1.2 Anforderungen an den Server

Im Zusammenhang mit der Client - Serverkommunikation muss ein Server folgende Voraussetzungen erfüllen:

**Speicherkapazität:** Die Auswertung der Bilddaten kann mit der Speicherkapazität aktueller Smartphones noch nicht effizient umgesetzt werden. Alleine die Auswertung des Fotos zur Detektion von markanten Bildpunkten, erfordert mehr Arbeitsspeicher als die aktuellen Smartphones bereitstellen. Außerdem muss die innere Orientierung der Kamera im Vorfeld anhand einer ebenfalls rechenintensiven Kalibrierung ermittelt werden, wenn diese a priori unbekannt ist. Nur damit kann die Amateurkamera als Messkamera genutzt werden. Daher müssen diese Auswertungsprozesse derzeit noch auf einen Server mit ausreichender Speicherkapazität ausgelagert werden. Für die Realisierung des Prototyps genügte dazu ein handelsüblicher PC mit einem Arbeitsspeicher von 3,2 GByte RAM.

**Datenbank:** Für eine Georeferenzierung muss eine Datenbank auf dem Server vorliegen, auf der entweder Musterbilder oder Codierungen abgelegt sind, die mit zu den detektierten Bildpunkten korrespondierenden Objektkoordinaten verknüpft sind, siehe Kapitel 3.2. Im Falle einer Standortabfrage des mobilen Nutzers muss ihm die berechnete Position wieder übermittelt und seine Position visualisiert werden, vorzugsweise durch die Abbildung in einer Karte. Daher muss auf dem Server weiterhin ein skalierbares Gebäudemodell vorliegen, von dem ein Ausschnitt mit der darin markierten Handyposition an das Handy zurückgeschickt wird.

#### 3.1.3 Algorithmen

Die Bildverarbeitung zur Detektion der benötigten Bildpunkte ist derzeit neben der Übertragungsdauer der zeitaufwändigste Abschnitt in der Prozesskette. Um diesen Auswerteabschnitt in einem vom Nutzer akzeptierten Zeitrahmen ( $< 1$  min) zu realisieren, ist es wichtig, möglichst effiziente und schnelle Berechnungsmethoden zur Detektion anzuwenden. Doch in jedem Fall gilt, je robuster und genauer die Detektion stattfinden soll, umso zeitintensiver sind die dazu benötigten Algorithmen.

#### 3.1.4 Infrastruktur

Ein OIPS benötigt eine markierte Infrastruktur, wenn die Position in einem übergeordneten Koordinatensystem bestimmt werden soll. Entweder sind in der Infrastruktur natürliche Merkmale, wie beispielsweise unterscheidbare Türen oder dauerhaft angebrachte Feuerlöscher vorhanden, die in den Bildern erkannt und eindeutig zugeordnet werden können, oder es müssen zusätzliche Marken angebracht werden. Die Merkmale oder Marken müssen mit dem übergeordneten Objektsystem georeferenziert und die Referenz z. B. in einer Datenbank gespeichert sein.

Als Markierung können zum einen bestimmte codierte Marker genutzt werden, die zuvor im Gebäude angebracht werden und deren Code in Verknüpfung mit einer Datenbank Angaben über ihre Position im Gebäude liefert. In Anwendungen im Bereich Augmented Reality werden solche codierten Marken genutzt, um die relative Orientierung zwischen Marke und Kamera herzustellen und dadurch ein virtuelles Objekt mit dem Abbild einer realen Szene zu überlagern (optisches Tracking). In Mulloni et al. (2009) wurden zu Versuchszwecken codierte, georeferenzierte Marken in einer Konferenzhalle angebracht, anhand derer sich Besucher durch Aufnahme der Marken mit ihrer Handykamera auf dem Gelände orientieren konnten (Abbildung 3.2-a).



(a) Quelle: Mulloni et al. (2009)



(b) Quelle: Hile & Boriello (2008)

Abbildung 3.2: Georeferenzierung mit codierten Marken oder mit natürlichen Landmarken

Durch die eindeutigen Landmarken kann eine genäherte Position sehr zuverlässig bestimmt werden. Allerdings muss der Nutzer die codierten Marken in unmittelbarer Nähe aufnehmen, wenn eine möglichst genaue Position abgeleitet werden soll.

Alternativ können bereits vorhandene, permanente Merkmale im Gebäude, wie z. B. Fenster, Türen, Säulen etc. zur Georeferenzierung genutzt werden. Hile & Boriello (2008) haben ein System entwickelt, welches in einem aktuellen Bild natürliche raumspezifische Landmarken wie Schnittlinien zwischen Boden und Wand, Türöffnungen etc. detektiert und diese mit dem Grundrissplan des Gebäudes vergleicht (Abbildung 3.2-b). Der Vorteil hierbei ist, dass die Referenzen besser verteilt und bildfüllend vorliegen und somit eine genauere Position abgeleitet werden kann. Nachteilig ist hierbei allerdings die Fehleranfälligkeit, die dadurch auftritt, dass die Landmarken in ähnlichen Umgebungen einem falschen Teil des Grundrissplans zugeordnet werden können. Die in Werner et al. (2011) angewendeten SIFT- und SURF-Algorithmen sollen eine zuverlässigere Zuweisung von aktueller Aufnahme zu einem Referenzbild ermöglichen. Allerdings sind diese Algorithmen sehr rechenintensiv. Weil hier keine dezidierten Punkte oder Linien dem Objektkoordinatensystem zugeordnet werden können, wird die aktuelle Position nur über das Verhältnis der Merkmalsdistanzen zwischen zwei Bildern bestimmt. Diese Methode liefert allerdings nur dann die in Werner et al. (2011) angegebenen Positionsgenauigkeit, wenn die Ausrichtung der Kamera in der aktuellen Aufnahme ungefähr der Kameraausrichtung zum Zeitpunkt der Referenzbildaufnahme entspricht.

Am sinnvollsten erscheint daher eine Kombination sowohl aus codierten als auch natürlichen Landmarken, um einerseits die Zuverlässigkeit zu steigern und andererseits die Position auch in größerer Entfernung bei

beliebiger Ausrichtung der Kamera möglichst genau bestimmen zu können.

### 3.2 Mögliche Systemarchitektur des OIPS

Die Grundidee des OIPS besteht darin, an Orten im Gebäude mit Sichtkontakt zu markanten Merkmalen die eigene Position mit einer kalibrierten Smartphone-Kamera zu bestimmen (Willert, 2010).

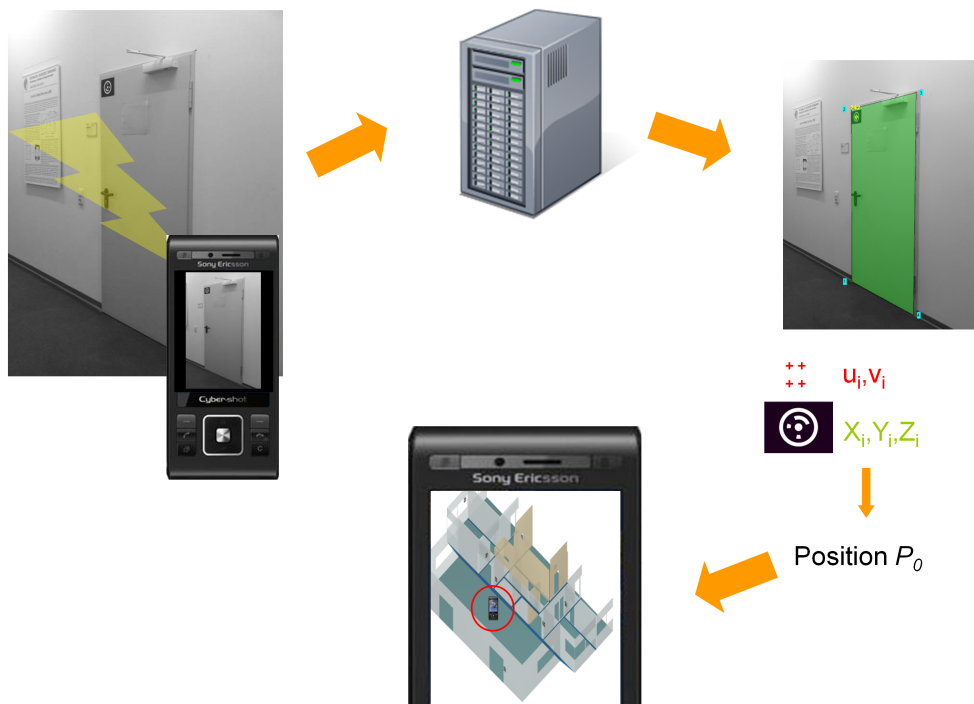


Abbildung 3.3: Ablaufskizze des OIPS-Konzepts

Dazu wird eine natürliche Landmarke aufgenommen. Für die vorliegende Arbeit werden Türen als natürliche Landmarken verwendet, da diese in der Regel in jedem Gebäude mit hinreichender Verteilung vorhanden sind. Zur eindeutigen Identifizierung in einer Datenbank werden die Türen mit einer visuellen Marke markiert.

Das aufgenommene Bild wird zusammen mit der Codierung anhand drahtloser Kommunikationsverfahren an einen zentralen Server gesendet. Die Türecken sowie die erfasste Codierung werden aus der Aufnahme extrahiert. Die Eckpunkte der Tür liegen damit als Bildkoordinaten  $(u_i, v_i)$  vor. Mit Hilfe der Codierung werden Position und Ausrichtung der Tür aus einer Datenbank ausgelesen und so die korrespondierenden Eckpunktkoordinaten im Gebäudereferenzsystem  $(X_i, Y_i, Z_i)$  identifiziert. Anhand der Punktkorrespondenzen kann die Position der Handyskamera im Referenzsystem berechnet werden. Die Position  $P_0$  wird in einem serverseitig vorhandenen Gebäudemodell abgebildet und der Kartenausschnitt mit eingetragener

Position in einem skalierbaren Bildformat an das Smartphone zurückgesendet, so dass die Position des Benutzers im Gebäude ihm auf seinem Display angezeigt werden kann.

Als mobiles Endgerät wurde in dieser Arbeit das Cybershot-Handy C905 von Sony Ericsson eingesetzt. Neben den Standardfunktionen erfüllt dieses Smartphone die Voraussetzungen für das OIPS. Für die Auswertung der Messdaten wurde ein Standard-PC von Transtec genutzt, auf dem ein Tomcat-Server für Serverapplikationen sowie eine Laufzeitumgebung zur Ausführung von Matlab-Code vorliegen (die wichtigsten Spezifikationen von Client und Server sind in Abbildung 3.4 aufgeführt).

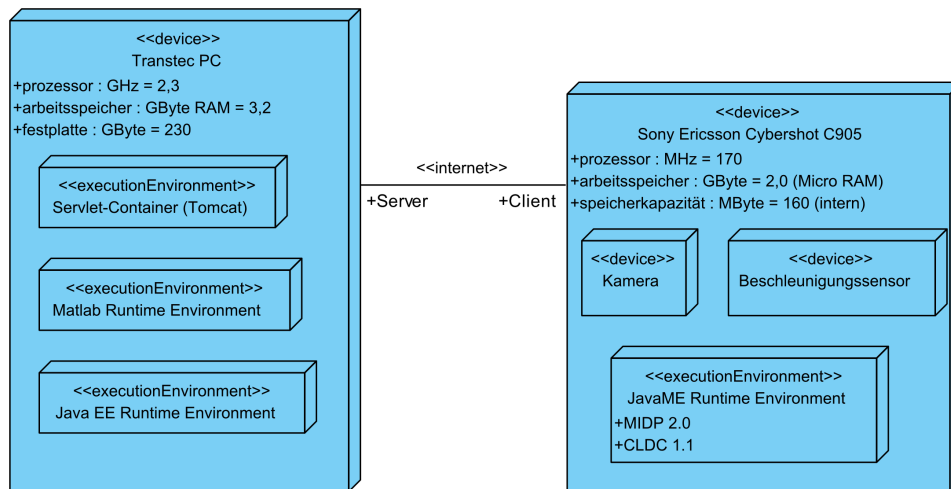


Abbildung 3.4: Verteilungsdiagramm zur Übersicht über die eingesetzten Systemkomponenten

Die Kamera ist ausgestattet mit einer 8,1 Mpx Kamera ( $2448 \times 3264$  px) mit Autofokus und 16-fachem Zoom, wodurch die Brennweite variiert. Bei Einstellung auf  $\infty$  wird der Autofokus ausgeschaltet. Nach empirischer Bestimmung beträgt die Brennweite bei Stellung auf  $\infty$   $f = 5,8932$  mm (bzw.  $f = 3398$  px) und die Größe der Sensorfläche  $4,2450 \times 5,6625$  mm<sup>2</sup>. Weitere Einstellungsmöglichkeiten sind zum einen die Aufnahme als Graustufenbild oder Farbbild. Graustufenbilder lassen sich einfacher verarbeiten, daher sollte bei der Aufnahme eines Objektes diese Einstellung gewählt werden.

Eine weitere Sensorkomponente des C905 ist ein integrierter Beschleunigungssensor. Bei dem hier entwickelten OIPS-Prototyp werden die Beschleunigungssensoren allerdings nur genutzt, um zu entscheiden, ob ein Bild im Hoch- oder Querformat aufgenommen worden ist.

Das C905 kann über verschiedene Standards drahtlos über das Internet mit anderen Geräten im Netzwerk kommunizieren (Tabelle 3.3).

Im C905 ist eine Java Runtime Environment für mobile Endgeräte (Java ME) integriert, wodurch es möglich ist, Java-Applikationen direkt auf dem Smartphone auszuführen.

## 4 Geometrische Positionsbestimmung

Zur Positionsbestimmung der Kamera in einem Objektkoordinatensystem werden korrespondierende Punkte aus unterschiedlichen Koordinatensystemen genutzt. Zum besseren Verständnis sollen daher zunächst die verschiedenen Systeme und ihr Zusammenhang untereinander erläutert werden.

### 4.1 Koordinatensysteme

Nach Luhmann (2010a) können für die Modellierung der Kameraorientierung vier Koordinatensysteme definiert werden (Abbildung 4.1):

- Objektkoordinatensystem  $(X,Y,Z)$ ,
- Kamerakoordinatensystem  $(x',y',z')$ ,
- Bildkoordinatensystem  $(x',y')$ ,
- Sensorkoordinatensystem  $(u,v)$ .

Aus der Messung und dem Abgleich mit der Datenbank stehen dem Nutzer die Sensorkoordinaten sowie die Objektkoordinaten zur Verfügung. Liegen aus einer Vorkalibrierung die intrinsischen Parameter bzw. die Parameter der inneren Orientierung der Kamera vor, können aus den Sensorkoordinaten die Kamerakoordinaten ermittelt werden.

Das Objektkoordinatensystem ist im Falle der Indoorpositionierung in der Regel durch ein Gebäudemodell festgelegt. Die  $X$ - und  $Y$ -Komponente können dabei aus dem vor Baubeginn angelegten Festpunktfeld übernommen worden sein. Die  $Z$ -Komponente repräsentiert die Höhe über dem Erdboden (Abbildung 4.1). Die Koordinaten der einzelnen Objekte, wie beispielsweise der Türen sind dabei in der Datenbank gespeichert. Pro Tür liegen 4 Referenzpunkte mit 3D-Koordinaten im Objektkoordinatensystem vor.

Die Achsen  $x'$ ,  $y'$  und die  $z'$ -Achse definieren das Kamerakoordinatensystem. Die  $z'$ -Koordinate der einzelnen Bildpunkte entspricht dabei der Kamerakonstanten  $c$ . Nach Luhmann (2010a) ist  $c$  der lotrechte Abstand des Projektionszentrums  $O'$  von der Bildebene in negativer  $z'$ -Richtung. Bei Fokussierung auf  $\infty$  entspricht sie in guter Näherung der Brennweite  $f$ . Im Folgenden wird von Fokussierung auf  $\infty$  ausgegangen, so dass gilt:  $f = c$ .

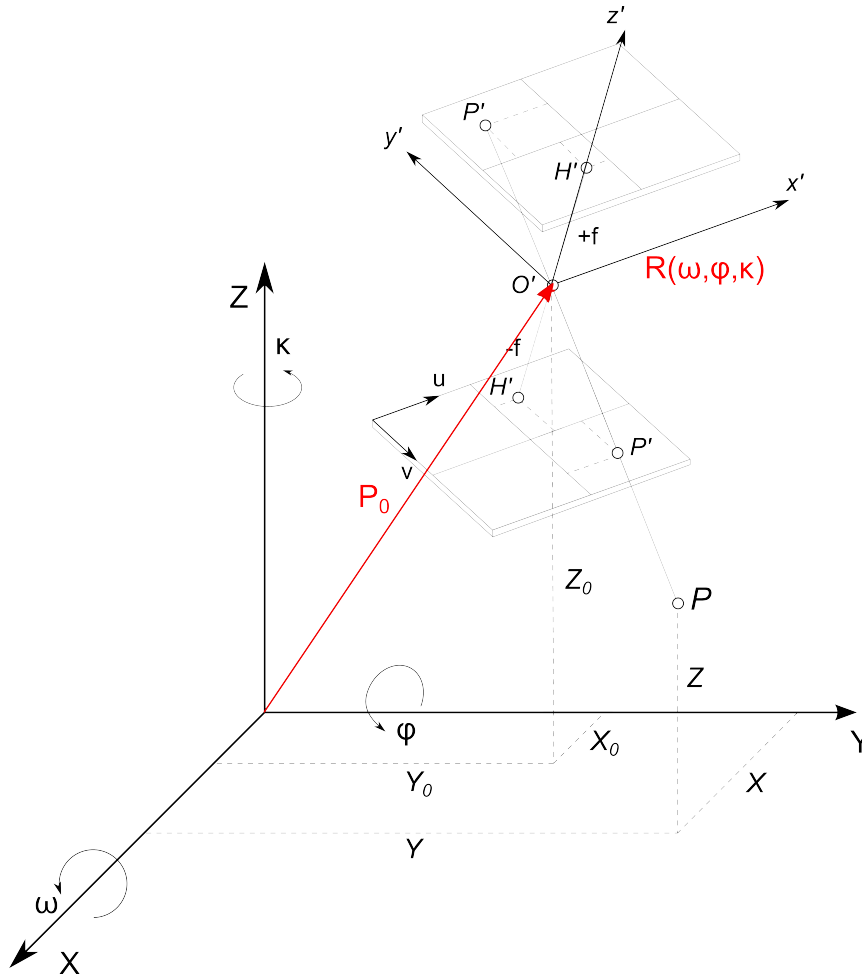


Abbildung 4.1: Koordinatensysteme, Quelle: Luhmann (2010a)

#### 4.1.1 Zusammenhang zwischen Sensor- und Kamerakoordinaten

Direkt aus dem Digitalbild werden die Sensorkoordinaten  $(u, v)$  eines Punktes abgegriffen. Der Zusammenhang zum Objektkoordinatensystem ist allerdings nur über das Kamerakoordinatensystem gegeben. Daher müssen von einem Punkt im Sensorsystem  $(u, v)$  zuerst die Kamerakoordinaten  $(x', y', z')$  abgeleitet werden.

Der Zusammenhang zwischen den beiden Systemen ist über die intrinsischen Parameter gegeben:

$$u = x'_H + x' \cdot (1 + d_1 \cdot (x'^2 + y'^2) + d_2 \cdot (x'^2 + y'^2)^2), \quad (4.1)$$

$$v = y'_H + y' \cdot (1 + d_1 \cdot (x'^2 + y'^2) + d_2 \cdot (x'^2 + y'^2)^2), \quad (4.2)$$

$$f = z'. \quad (4.3)$$

Dabei sind  $d_1$  und  $d_2$  die radialen Verzeichnungsparameter,  $H' = (x'_H, y'_H)$  der Bildhauptpunkt und  $z'$  entspricht der Kamerakonstanten  $c$  bzw. der Brennweite  $f$ . Die intrinsischen Parameter bzw. die innere Orientierung der Kamera und ihre Bestimmung mittels Kalibrierung sind in Kapitel 6 beschrieben.

#### 4.1.2 Zusammenhang zwischen Bild- und Objektkoordinatensystem

Anhand der intrinsischen Parameter und der Parameter der äußeren Orientierung ( $X_0, Y_0, Z_0, \omega, \varphi, \kappa = 6$  Degrees of Freedom (DOF)) kann ein Objektpunkt  $(X, Y, Z)$  in den korrespondierenden Bildpunkt  $(x', y')$  überführt werden. Der Zusammenhang zwischen Kamera- und Objektkoordinaten mit den Kalibrierparametern erfolgt in der Photogrammetrie über die Kollinearitätsgleichungen:

$$x' = f \cdot \frac{r_{11} \cdot (X - X_0) + r_{21} \cdot (Y - Y_0) + r_{31} \cdot (Z - Z_0)}{r_{13} \cdot (X - X_0) + r_{23} \cdot (Y - Y_0) + r_{33} \cdot (Z - Z_0)}, \quad (4.4)$$

$$y' = f \cdot \frac{r_{12} \cdot (X - X_0) + r_{22} \cdot (Y - Y_0) + r_{32} \cdot (Z - Z_0)}{r_{13} \cdot (X - X_0) + r_{23} \cdot (Y - Y_0) + r_{33} \cdot (Z - Z_0)}, \quad (4.5)$$

wobei

$$\begin{aligned} x' &= x'(u, v, d_1, d_2, x'_H, y'_H), \\ y' &= y'(u, v, d_1, d_2, x'_H, y'_H), \\ f &= \text{Brennweite,} \\ (x'_H, y'_H) &= \text{Bildhauptpunkt,} \\ \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{pmatrix} &= \text{Rotationsmatrix } \mathbf{R}_{\omega\varphi\kappa}, \\ \begin{pmatrix} X_0 & Y_0 & Z_0 \end{pmatrix} &= \text{Koordinaten des Kameraursprungs im Objektkoordinatensystem.} \end{aligned}$$

Die Matricelemente von  $\mathbf{R}_{\omega\varphi\kappa}$  stehen in funktionalem Zusammenhang mit drei Drehwinkeln ( $\omega, \varphi, \kappa$ ) (3 DOF), welche die Ausrichtung des Kamerakoordinatensystems im Objektkoordinatensystem beschreiben (Luhmann, 2010a). Die Positionsbestimmung anhand einer Bildaufnahme erfolgt in der Photogrammetrie über den räumlichen Rückwärtsschnitt (RWS). Anhand des dreidimensionalen RWS lässt sich somit zunächst die 3D-Position der Kamera (3 DOF) bestimmen. Anschließend wird die Rotationsmatrix bzw. die drei Drehwinkel über eine Transformation bestimmt. Durch  $\mathbf{P}_0 = (X_0, Y_0, Z_0)$  und  $\mathbf{R}_{\omega\varphi\kappa}$  sind damit alle 6 DOF der Kamera bestimmt.

Klassisch wird der räumliche RWS aus den Kollinearitätsgleichungen abgeleitet. Allerdings müssen dann Näherungswerte für die Berechnung der äußeren Orientierung vorliegen. Im vorliegenden Fall der Positionierung mit einer Handykamera sind die sechs Freiheitsgrade der Kamera zum Zeitpunkt

der Einzelbildaufnahme allerdings a priori unbekannt, so dass keine hinreichend genauen Näherungswerte für die äußere Orientierung angegeben werden können. Daher muss die Handypositionierung durch alternative Ansätze bestimmt werden, die ohne Näherungswerte der äußeren Orientierung auskommen.

## 4.2 Ansätze zur Bestimmung der 6 DOF der Kameraorientierung

In der Literatur sind alternative Algorithmen beschrieben, die eine Berechnung der 6 DOF ohne Näherungswerte ermöglichen, z. B. Grunert (1841), Killian (1955), Kyle (1990), Wrobel (2001), Rohrberg (2009). Allerdings müssen auch für diese Ansätze die intrinsischen Parameter der Kamera bekannt sein. Um eine Lösung zu berechnen, sind prinzipiell drei korrespondierende Punkte in Kamera- und Objektkoordinatensystem ausreichend. Allerdings liefern 3 Passpunkte mehrere Lösungsmöglichkeiten. Um eine eindeutige Lösung zu bestimmen, benötigt man einen vierten Punkt. In Haralick et al. (1994) wurden verschiedene Ansätze, die zunächst mit 3 Punkten verschiedene Lösungen ermöglichen und erst im Nachhinein durch Hinzunahme eines vierten Punktes eine eindeutige Lösung liefern, auf ihre Stabilität untersucht und die Ergebnisse veröffentlicht.

Der älteste und rein analytische Ansatz zur Lösung des räumlichen Rückwärtsschnitts wurde von Grunert (1841) veröffentlicht. Das jüngste Verfahren, welches ebenfalls zunächst nur 3 Punkte zur Lösung des räumlichen RWS benötigt, ist ein numerischer Ansatz nach Rohrberg (2009). Des weiteren stellt Killian (1955) einen Lösungsansatz vor, der direkt aus 4 Punkten eine Positionslösung ermöglicht.

Da sich diese drei Lösungsverfahren vom Ansatz her grundlegend unterscheiden, wurden sie für die vorliegende Arbeit in Matlab implementiert und bezüglich ihrer Robustheit und Genauigkeit miteinander verglichen. Abbildung 4.2 skizziert die Lösungswege der drei Ansätze.

### 4.2.1 Ansätze mit 3-Punkt-Algorithmen

Die meisten Ansätze beruhen auf der Berechnung der Position anhand von zunächst drei korrespondierenden Punkten. Erst danach wird ein vierter Punkt hinzugezogen, um eine eindeutige Lösung zu finden (siehe Abbildung 4.3).

**Bestimmung der Raumwinkel:** Seien  $p_i = (x'_i, y'_i)^T$  die Punkte im Bild und  $P_i = (X_i, Y_i, Z_i)^T$  die Punkte in Objektkoordinaten für  $i = 1 \dots 4$ .

Die Einheitsvektoren auf die Punkte sind dann

$$e_i = \frac{1}{\sqrt{x_i'^2 + y_i'^2 + f^2}} \begin{pmatrix} x'_i \\ y'_i \\ f \end{pmatrix}. \quad (4.6)$$



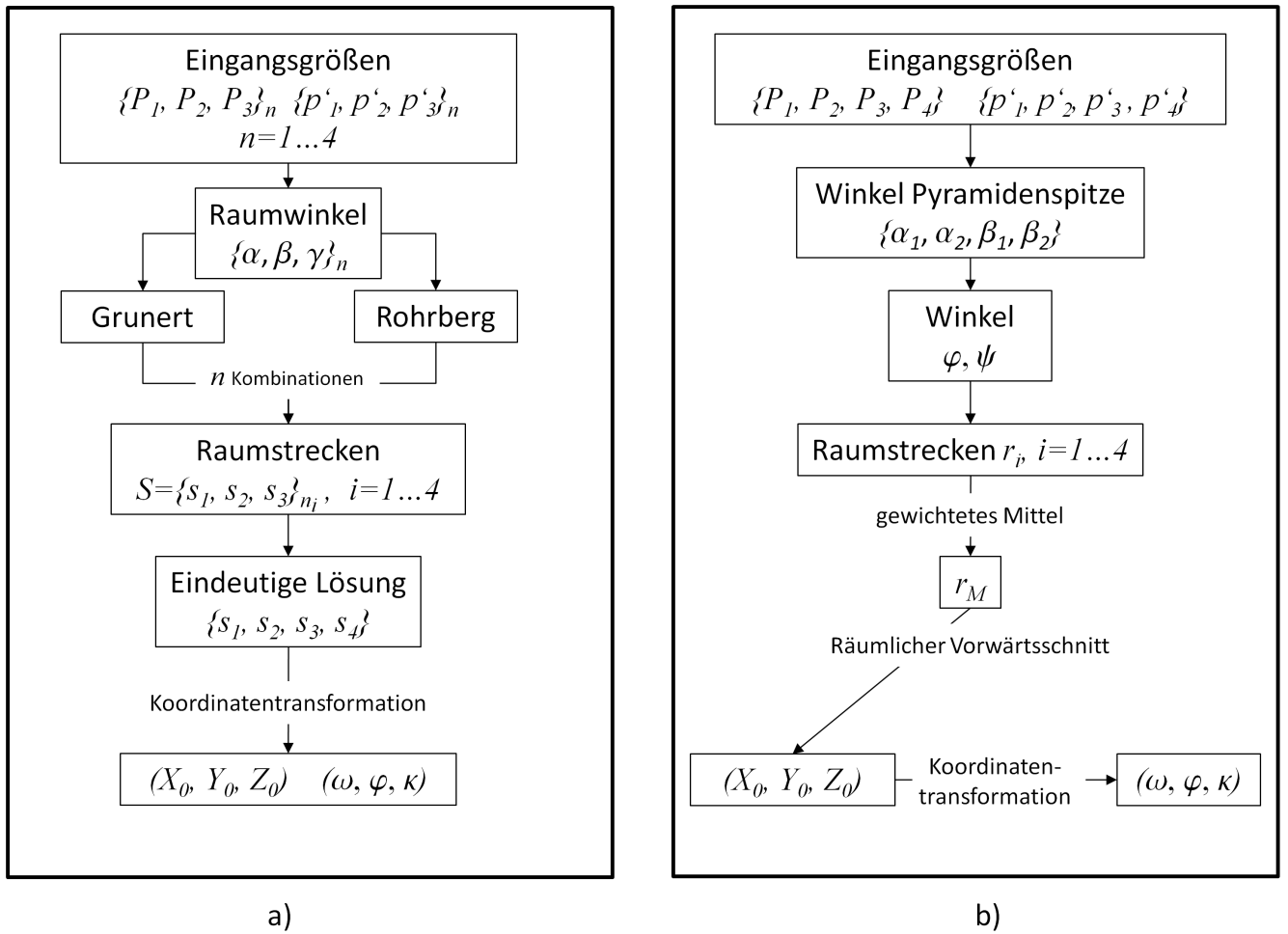


Abbildung 4.2: Ablaufdiagramm a) 3-Punkt-Algorithmen, b) 4-Punkt-Algorithmus

Mit den Einheitsvektoren lassen sich nun die Raumwinkel  $(\alpha, \beta, \gamma)$  angeben:

$$\cos \alpha = \mathbf{e}_2 \cdot \mathbf{e}_3, \quad (4.7)$$

$$\cos \beta = \mathbf{e}_1 \cdot \mathbf{e}_3, \quad (4.8)$$

$$\cos \gamma = \mathbf{e}_1 \cdot \mathbf{e}_2. \quad (4.9)$$

**Bestimmung der Raumstrecken:** Die Türeckpunkte in Bild- und Objektkoordinaten ( $p_i$  und  $P_i$ ,  $i = 1 \dots 4$ ), Kantenlängen  $a, c$  und Diagonale  $b$  (Abbildung 4.3) sowie die Kameraparameter, Brennweite  $f$  und Bildhauptpunkt  $H'$ , sind a priori bekannt. Um die absolute Orientierung der Kamera im Raum zu bestimmen, sind neben den Raumwinkeln auch die unbekannten Abstände der Türecken vom Kameraursprung  $S = \{s_1, s_2, s_3, s_4\}$  zu bestimmen.

Da ein direktes Lösen des perspektivischen Vierpunktproblems mit den 3-Punkt-Algorithmen nicht möglich ist, wird hier ein Dreipunktproblem für jede ungeordnete Teilmenge dreier Elemente aus  $P$  gelöst. Aus den vier verschiedenen Ergebnissen für jedes Element aus  $S$  wird anschließend der Mittelwert gebildet,

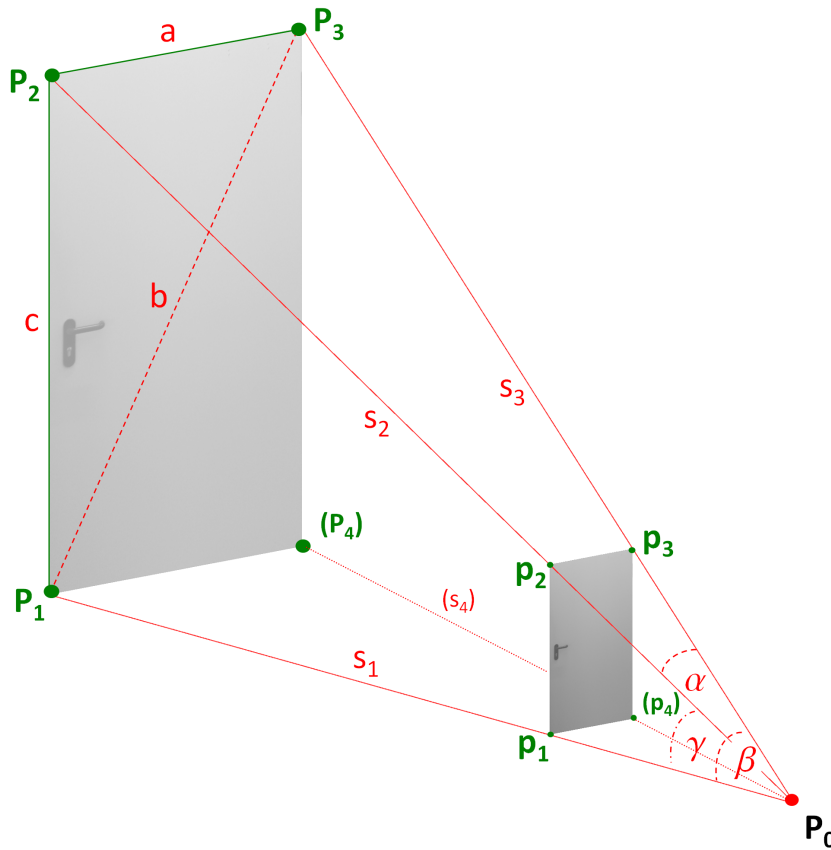


Abbildung 4.3: Ansatz über drei Passpunktpaare nach Grunert

um so ein möglichst genaues Ergebnis zu erhalten.

Die Bestimmung der Raumstrecken ist bei den Ansätzen nach Grunert (1841) und Rohrberg (2009) unterschiedlich.

### Lösungsansatz nach Grunert

Exemplarisch wird der Grunert-Algorithmus für das Teildreieck  $P_1, P_2, P_3$  beschrieben. Die Berechnungen für die übrigen Teildreiecke (z. B.  $P_1, P_3, P_4$ ) funktionieren analog.

Mit Hilfe des Kosinus-Satzes ergeben sich die Beziehungen

$$a^2 = s_2^2 + s_3^2 - 2s_2s_3 \cos \alpha, \quad (4.10)$$

$$b^2 = s_1^2 + s_3^2 - 2s_1s_3 \cos \beta, \quad (4.11)$$

$$c^2 = s_1^2 + s_2^2 - 2s_1s_2 \cos \gamma. \quad (4.12)$$

Substituiert man darin  $s_2 = u \cdot s_1$  und  $s_3 = v \cdot s_1$ , so können für  $s_1$  drei Gleichungen angegeben

werden:

$$s_1^2 = \frac{a^2}{u^2 + v^2 - 2uv \cos \alpha}, \quad (4.13)$$

$$s_1^2 = \frac{b^2}{1 + v^2 - 2v \cos \beta}, \quad (4.14)$$

$$s_1^2 = \frac{c^2}{1 + u^2 - 2u \cos \gamma}. \quad (4.15)$$

Weiter können diese drei Gleichungen auf zwei quadratische Gleichungen reduziert werden:

$$u^2 - \frac{b^2 - a^2}{b^2} v^2 - 2uv \cos \alpha + 2 \frac{a^2}{b^2} v \cos \beta - \frac{a^2}{b^2} = 0, \quad (4.16)$$

$$u^2 - \frac{c^2}{b^2} v^2 + 2v \frac{c^2}{b^2} \cos \beta - 2u \cos \gamma + \frac{b^2 - c^2}{b^2} = 0. \quad (4.17)$$

Hieraus lässt sich eine Lösung für  $u$  in Abhängigkeit von  $v$  angeben:

$$u = \frac{(\lambda - 1) \cdot v^2 - 2\lambda v \cdot \cos \beta + 1 + \lambda}{2(\cos \gamma - v \cdot \cos \alpha)}, \quad \lambda = \frac{a^2 - c^2}{b^2}. \quad (4.18)$$

Diese Gleichung für  $u$  eingesetzt in (4.17) führt auf ein Polynom vierter Ordnung in  $v$ :

$$A_4 v^4 + A_3 v^3 + A_2 v^2 + A_1 v + A_0 = 0. \quad (4.19)$$

Grunert hat die Koeffizienten dieses Polynoms allgemein angegeben:

$$\begin{aligned} A_4 &= (\lambda - 1)^2 - 4 \frac{c^2}{b^2} \cos^2 \alpha, \\ A_3 &= 4(\lambda(1 - \lambda) \cos \beta - (1 - \vartheta) \cos \alpha \cos \gamma + 2 \frac{c^2}{b^2} \cos^2 \alpha \cos \beta), \\ A_2 &= 2(\lambda^2 - 1 + 2\lambda^2 \cos^2 \beta + 2 \frac{b^2 - c^2}{b^2} \cos^2 \alpha \\ &\quad - 4\vartheta \cos \alpha \cos \beta \cos \gamma + 2 \frac{b^2 - a^2}{b^2} \cos^2 \gamma), \\ A_1 &= 4(-\lambda(1 + \lambda) \cos \beta + 2 \frac{a^2}{b^2} \cos^2 \gamma \cos \beta - (1 - \vartheta) \cos \alpha \cos \gamma), \\ A_0 &= (1 + \lambda)^2 - 4 \frac{a^2}{b^2} \cos^2 \gamma, \\ \text{mit } \lambda &= \frac{a^2 - c^2}{b^2}, \quad \vartheta = \frac{a^2 + c^2}{b^2}. \end{aligned} \quad (4.20)$$

Dieses Polynom lässt sich nun für  $v$  lösen und für jede Lösung von  $v$  kann ein  $u$  bestimmt werden. Mit diesen Wertepaaren können dann  $s_1, s_2, s_3$  bestimmt werden. Unter den bis zu vier Lösungen für die Kombinationen  $\{u, v\}$  können diejenigen ausgeschlossen werden, welche imaginär oder negativ sind. In der Praxis aber verbleiben dennoch zwei oder vier reelle Lösungen (daher  $n_i$  Raumstrecken-Kombinationen mit  $i = 1 \dots 4$  in Abbildung 4.2-a).

### Lösungsansatz nach Rohrberg

Eine effektive Methode zur Umsetzung in einem Programm wurde von Rohrberg (2009) vorgestellt. Hierbei werden die Raumstrecken mittels Kurvendiskussion ermittelt.

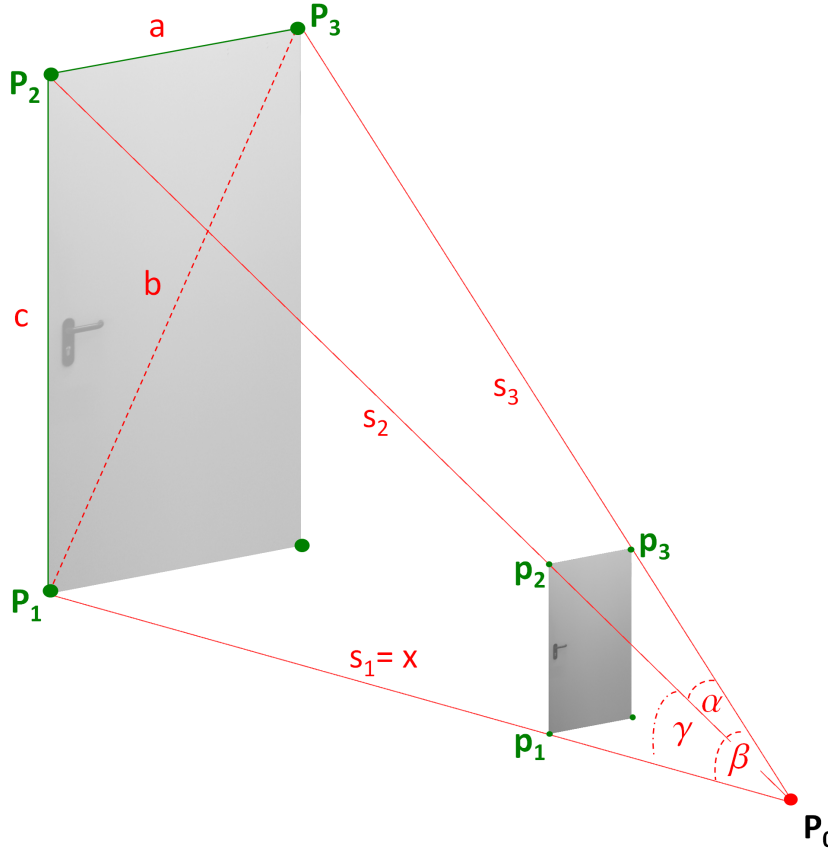


Abbildung 4.4: Ansatz über drei Passpunktpaare nach Rohrberg

Analog zum Ansatz nach Grunert (1841) wird auch der Rohrberg-Algorithmus exemplarisch für das Teildreieck  $P_1, P_2, P_3$  beschrieben (Abbildung 4.4). Die Winkel lassen sich wieder aus den Beziehungen (4.7)-(4.9) unter Kenntnis der Bildpunkte  $p_i$  und der Brennweite  $f$  berechnen. Wie bei Grunert (1841) können die Strecken  $a, b, c$  anhand der Koordinaten von  $P_i$  direkt berechnet werden oder lassen sich über den Kosinussatz als Funktion zweier anliegender Strahlen und dem gegenüberliegenden Winkel an der Tetraederspitze beschreiben (siehe Gleichungen (4.10)-(4.12)). Die Gleichungen werden nach  $a, b, c$  aufgelöst:

$$a = \sqrt{s_2^2 + s_3^2 - 2 \cdot s_2 \cdot s_3 \cdot \cos(\alpha)}, \quad (4.21)$$

$$b = \sqrt{s_3^2 + s_1^2 - 2 \cdot s_3 \cdot s_1 \cdot \cos(\beta)}, \quad (4.22)$$

$$c = \sqrt{s_1^2 + s_2^2 - 2 \cdot s_1 \cdot s_2 \cdot \cos(\gamma)}. \quad (4.23)$$

Zwei der drei Strahlen  $s_i$  können mit Hilfe einer angrenzenden Kante  $a, b$  oder  $c$  und einem angrenzenden Winkel als Funktion des verbleibenden dritten Strahls dargestellt werden. Im Folgenden werden beispielhaft

die Strahlen  $s_2$  und  $s_3$  in Abhängigkeit von  $s_1$  dargestellt, wobei  $s_1$  mit  $x$  bezeichnet wird. Die Funktionen für  $s_2$  und  $s_3$  liefern jeweils zwei Gleichungen (4.24) und (4.25):

$$s_{21,2}(x) = x \cdot \cos(\gamma) \pm \sqrt{c^2 - (x \cdot \sin(\gamma))^2}, \quad (4.24)$$

$$s_{31,2}(x) = x \cdot \cos(\beta) \pm \sqrt{b^2 - (x \cdot \sin(\beta))^2}. \quad (4.25)$$

Durch Einsetzen von (4.24) und (4.25) in (4.21) erhält man  $a$  als Funktion  $a_i(x)$  ( $i = 1 \dots 4$ ) in Abhängigkeit von  $x$  und den Konstanten  $(b, c, \alpha, \beta, \gamma)$ :

$$a_i(x) = \sqrt{s_{2k}(x)^2 + s_{3l}(x)^2 - 2 \cdot s_{2k}(x) \cdot s_{3l}(x) \cdot \cos(\alpha)}, \text{ mit } k, l = 1, 2. \quad (4.26)$$

Zugleich wird  $a$  aus den Passpunktkoordinaten berechnet. Daher kann die Lösung für  $x$  durch Gleichsetzen der Funktion  $a_i(x)$  mit der berechneten Größe  $a$  bestimmt werden.

Die vier Funktionen  $a_i(x)$  gelten in unterschiedlichen Wertebereichen für  $x$ :

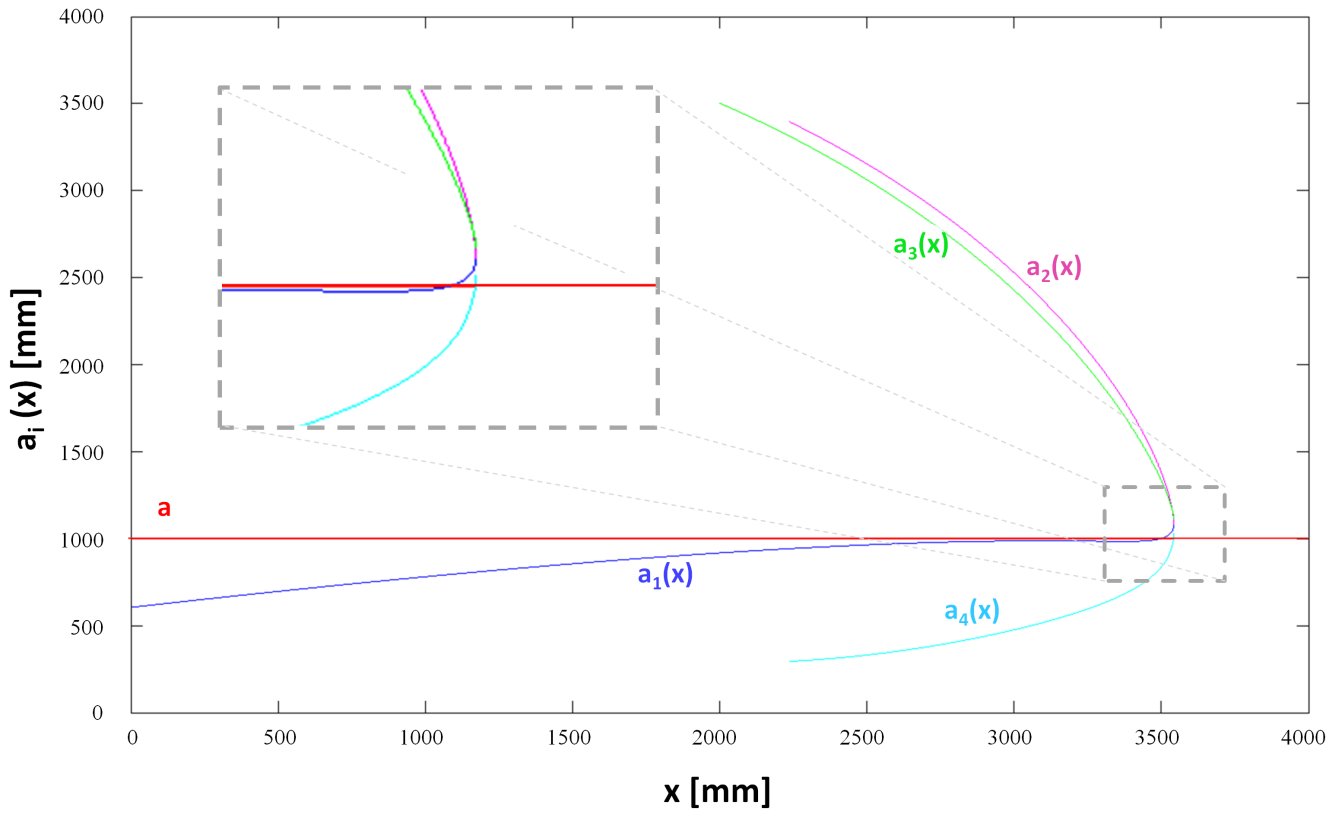
- $0 \leq x \leq x_{max}$  für  $k = 1, l = 1$ ,
- $b \leq x \leq x_{max}$  für  $k = 1, l = 2$ ,
- $c \leq x \leq x_{max}$  für  $k = 2, l = 1$ ,
- $\max(b, c) \leq x \leq x_{max}$  für  $k = 2, l = 2$ ,

wobei  $x_{max} = \min(\frac{b}{\sin \beta}, \frac{c}{\sin \gamma})$ .

Für die nichtlinearen Funktionen  $a_i(x)$  muss nun bestimmt werden, welche Zweige in ihrem Intervall die Konstante  $a$  schneiden (siehe Abbildung 4.5). Die Berechnung der Schnittpunkte ( $a_i(x) - a = 0$ ) wird durch iterative Anwendung des Newton-Verfahrens bestimmt. Realisiert wird das Newton-Verfahren mithilfe der Matlab-internen Funktionen `fminbnd()` und `fzero()`. Die Schnittpunkte der Funktionszweige  $a_i(x)$  mit der Konstanten  $a$  liefern die Lösungen für  $x$ . Abbildung 4.5 zeigt den Funktionsgraphen. Die unterschiedlichen Funktionszweige sind verschiedenfarbig dargestellt. In dem Beispiel ergeben sich zwei Lösungen, eine für Funktionszweig  $a_1(x)$  und eine für  $a_4(x)$ .

Aus den Lösungen für  $x$  ergeben sich die übrigen Strahlenlängen  $s_{2k}$  sowie  $s_{3l}$  ( $k, l = 1, 2$ ) gemäß (4.24) und (4.25). Wie auch beim Algorithmus nach Grunert (1841) erhält man bis zu 4 mögliche Lösungssätze  $(x = s_1, s_2, s_3)_i$ , ( $i = 1 \dots 4$ ), für die Strahlen. Aus den berechneten Bestimmungsstücken des Tetraeders lässt sich anschließend ebenfalls die Länge  $s_4$  von einem vierten Referenzpunkt  $P_4$  bestimmen.

**Bestimmung der eindeutigen Lösung:** Die Bestimmung der eindeutigen Lösung ist für die beiden 3-Punkt-Algorithmen wieder gleich (Abbildung 4.2-a). Als Strategie zur Bestimmung der richtigen Lösung wird ausgenutzt, dass eigentlich ein perspektivisches Vierpunktproblem gelöst werden soll. Wählt man jeweils zwei Kombinationen dreier Türeckpunkte, z. B.  $\{P_1, P_2, P_3\}$  und  $\{P_1, P_2, P_4\}$ , so können mit


 Abbildung 4.5: Schnittpunkte der Funktionszweige  $a_i(x)$  mit der Konstanten  $a$ 

Hilfe des Grunert- oder Rohrberg-Algorithmus die bis zu vier Lösungen  $\{s_1, s_2, s_3\}_i$  und  $\{s_1, s_2, s_4\}_j$  für  $i, j = 1 \dots 4$  bestimmt werden. Die Einheitsvektoren  $\mathbf{e}_i$  (4.6) und die ermittelten Seitenlängen  $s_i$  definieren die Vektoren  $\mathbf{s}_i$ . Als jeweils richtige Lösung der beiden Mengen werden die beiden ausgewählt, deren Vektoren  $\{\mathbf{s}_1, \mathbf{s}_2, \mathbf{s}_3\}$  und  $\{\mathbf{s}_1, \mathbf{s}_2, \mathbf{s}_4\}$  zwei Ebenen aufspannen, die möglichst parallel sind. Dazu werden die Normalenvektoren  $\mathbf{n}_{1i}$  und  $\mathbf{n}_{2j}$  anhand der Minimumsbedingung in (4.27) auf ihre Parallelität hin geprüft:

$$\begin{aligned} \mathbf{n}_{1i} &= (\mathbf{s}_{2i} - \mathbf{s}_{1i}) \times (\mathbf{s}_{3i} - \mathbf{s}_{1i}), \\ \mathbf{n}_{2j} &= (\mathbf{s}_{2j} - \mathbf{s}_{1j}) \times (\mathbf{s}_{4j} - \mathbf{s}_{1j}), \quad i, j = 1 \dots 4, \end{aligned} \quad (4.27)$$

$$\varphi^* = \underset{\varphi_{i,j}}{\operatorname{argmin}} \varphi_{i,j} = \arccos \frac{\mathbf{n}_{1i} \cdot \mathbf{n}_{2j}}{\|\mathbf{n}_{1i}\| \cdot \|\mathbf{n}_{2j}\|}.$$

**Absolute Orientierung:** Als letztes sollen die Position der Kamera (3 DOF) und deren Orientierung im Objektkoordinatensystem (3 DOF) ermittelt werden. Dazu wird die Transformationsvorschrift gesucht, welche einen Punkt im Kamerakoordinatensystem in das Objektkoordinatensystem transformiert. Zwei Ansätze können dazu genutzt werden:

Zum einen wird die absolute Orientierung nach Horn (1987) mit drei von vier Türeckpunkten berechnet. In diesem Fall ergibt sich die Rotationsmatrix  $\mathbf{R}_{\omega\varphi\kappa}$ , welche die Einheitsvektoren des Kamerakoor-

dinatensystems in das Objektkoordinatensystem überführt, direkt aus dem Produkt der Matrix der Einheitskoordinaten.  $\{P_{1K}, P_{2K}, P_{3K}\}$  sind die drei Punkte im Kamerakoordinatensystem (im Folgenden mit Index  $K$  bezeichnet) und  $\{P_{1O}, P_{2O}, P_{3O}\}$  die korrespondierenden Punkte in Objektkoordinaten (im Folgenden mit Index  $O$  bezeichnet). Da durchweg rechtwinklige Türen betrachtet werden, können für beide Koordinatensysteme die orthogonalen Einheitsvektoren

$$\mathbf{e}_x = \frac{\mathbf{s}_3 - \mathbf{s}_2}{\|\mathbf{s}_3 - \mathbf{s}_2\|}, \quad \mathbf{e}_y = \frac{\mathbf{s}_2 - \mathbf{s}_1}{\|\mathbf{s}_2 - \mathbf{s}_1\|}, \quad \mathbf{e}_z = \mathbf{e}_x \times \mathbf{e}_y,$$

und damit die orthonormale Rotationsmatrix

$$\mathbf{R}_{\omega\varphi\kappa} = \mathbf{M}_K \cdot \mathbf{M}_O = [\mathbf{e}_{x,K}, \mathbf{e}_{y,K}, \mathbf{e}_{z,K}] \cdot [\mathbf{e}_{x,O}, \mathbf{e}_{y,O}, \mathbf{e}_{z,O}]^T \quad (4.28)$$

angegeben werden. Für die Translation folgt damit

$$\mathbf{t} = \mathbf{s}_{1,O} - \mathbf{R}_{\omega\varphi\kappa} \cdot \mathbf{s}_{1,K}. \quad (4.29)$$

Zum anderen wird in Horn (1987) bzw. Horn et al. (1988) eine weitere Möglichkeit zur Berechnung der absoluten Orientierung gegeben, bei der auch mehr als drei Punkte verwendet werden können. Dabei wird die Transformationsvorschrift zunächst um einen Skalierungsparameter  $s$  auf

$$\mathbf{P}_O = s \cdot \mathbf{R}_{\omega\varphi\kappa} \cdot \mathbf{P}_K + \mathbf{t}$$

erweitert. In diesem Fall wird die orthonormale Rotationsmatrix aus mehr als drei Punkten bestimmt. Dadurch wird eine möglichst gute Überführung der Punkte von einem Koordinatensystem in das andere erzielt. Dies wird im Kern durch eine Singulärwertzerlegung erreicht. Mit Hilfe dieser Methode ist es möglich, für den vorliegenden Fall eine absolute Orientierung anzugeben, die sich aus allen bekannten Eckpunkten berechnet und keine Information ignoriert. Da die Rotation für das hier konzipierte Positionierungssystem nur ein sekundäres Merkmal darstellt, wird ihre Bestimmung nicht näher erläutert. Eine detaillierte Beschreibung des Lösungsansatzes der absoluten Orientierung findet sich in Horn et al. (1988).

#### 4.2.2 Ansatz mit 4-Punkt-Algorithmus nach Killian

Anders als bei den beiden bereits aufgeführten Verfahren wird beim 4-Punkt-Algorithmus zum einen der vierte Punkt von Anfang an in die Berechnung miteinbezogen, zum anderen die Bedingung vorausgesetzt, dass alle vier Punkte in einer Ebene liegen. Am Ende muss keine Fallunterscheidung durchgeführt werden, um eine eindeutige Lösung zu berechnen (vgl. Abbildung 4.2-b). Im Ansatz von Killian (1955) wird ein Verfahren vorgestellt, welches obige Nebenbedingung berücksichtigt und so eine direkte Berechnung der Lösung ermöglicht. Geometrisch betrachtet, bildet das Projektionszentrum  $\mathbf{P}_0$  mit den vier Türeckpunkten  $\mathbf{P}_i$  ( $i = 1 \dots 4$ ) eine Pyramide (vgl. Abbildung 4.6).

Die Türdiagonalen  $P_1P_3$  und  $P_2P_4$  schneiden sich in  $\mathbf{S}$ . Dieser Diagonalschnittpunkt entspricht im

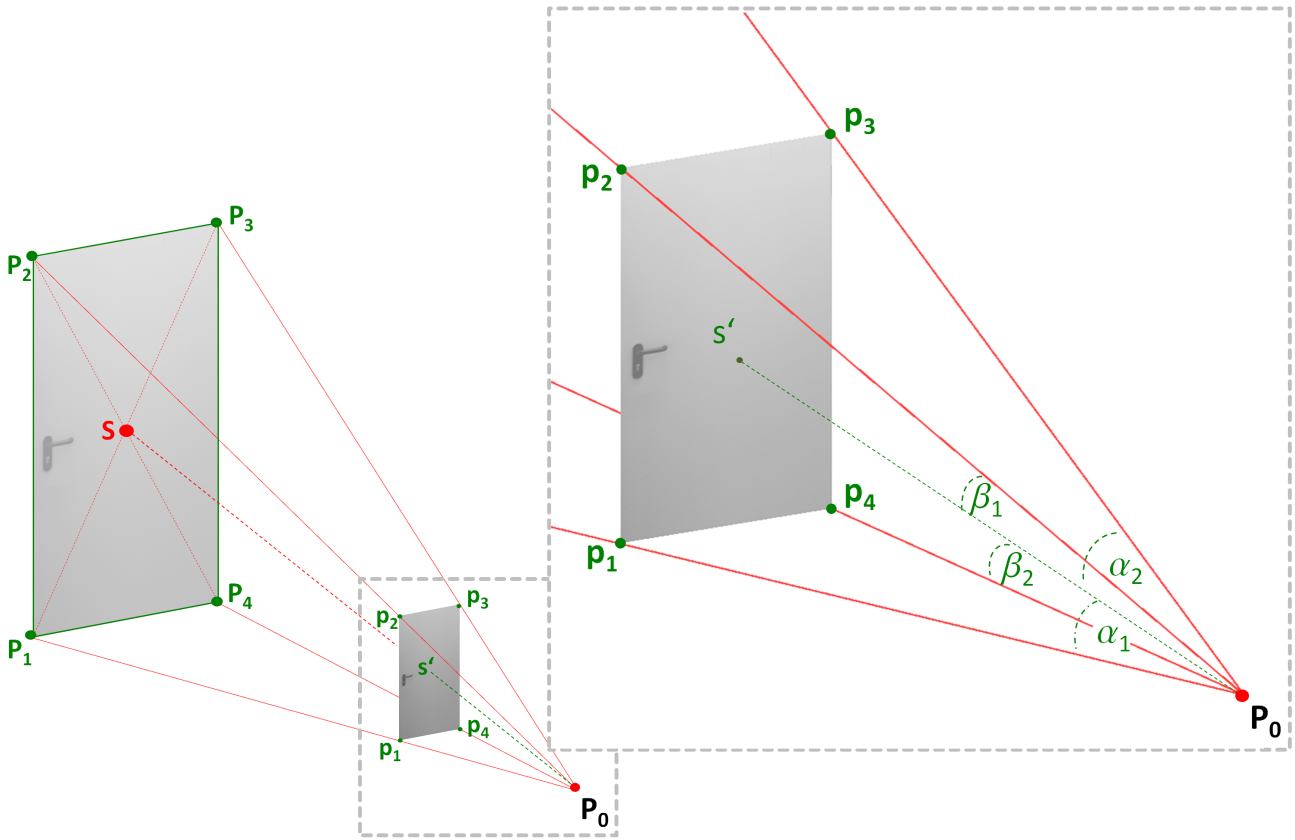


Abbildung 4.6: Ansatz über vier Passpunktpaare nach Killian; links: Gesamtdarstellung in Objekt- und Kamerakoordinatensystem, rechts: Detailansicht des Kamerasystems

Bildsystem  $\mathbf{s}'$  und ist Schnittpunkt der Diagonalen  $p_1p_3$  und  $p_2p_4$ . Um die Koordinaten des Projektionszentrums zu ermitteln, müssen zunächst noch fehlende Bestimmungsstücke der Pyramide berechnet werden. Die Bestimmungsstücke der Pyramide sind zum einen die Winkel  $\alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2$  an der Pyramidenspitze. Sie werden anhand der Vektoren  $\mathbf{p}_i$  ( $i = 1 \dots 4$ ) und  $\mathbf{s}'$  im Kamerasystem, welche vom Projektionszentrum zu den Bildpunkten  $p_i$  der Türecke führen, berechnet (4.30).

$$\begin{aligned} \cos \alpha_1 &= \frac{\mathbf{p}_1 \cdot \mathbf{s}'}{\|\mathbf{p}_1\| \cdot \|\mathbf{s}'\|}, & \cos \alpha_2 &= \frac{\mathbf{p}_3 \cdot \mathbf{s}'}{\|\mathbf{p}_3\| \cdot \|\mathbf{s}'\|}, \\ \cos \beta_1 &= \frac{\mathbf{p}_2 \cdot \mathbf{s}'}{\|\mathbf{p}_2\| \cdot \|\mathbf{s}'\|}, & \cos \beta_2 &= \frac{\mathbf{p}_4 \cdot \mathbf{s}'}{\|\mathbf{p}_4\| \cdot \|\mathbf{s}'\|}. \end{aligned} \quad (4.30)$$

Im nächsten Schritt werden die Winkel  $\varphi$  und  $\psi$  berechnet (Abbildung 4.7), welche zwischen den Vektoren  $\mathbf{r} = \mathbf{P}_0\mathbf{S}$  und  $\mathbf{P}_1\mathbf{P}_3$  bzw.  $\mathbf{P}_2\mathbf{P}_4$  liegen, vgl. (4.31), (4.32).

$$\cot \varphi = \frac{a_2 \cdot \cot \alpha_2 - a_1 \cdot \cot \alpha_1}{a_2 + a_1} \quad (4.31)$$

$$\cot \psi = \frac{b_2 \cdot \cot \beta_2 - b_1 \cdot \cot \beta_1}{b_2 + b_1} \quad (4.32)$$



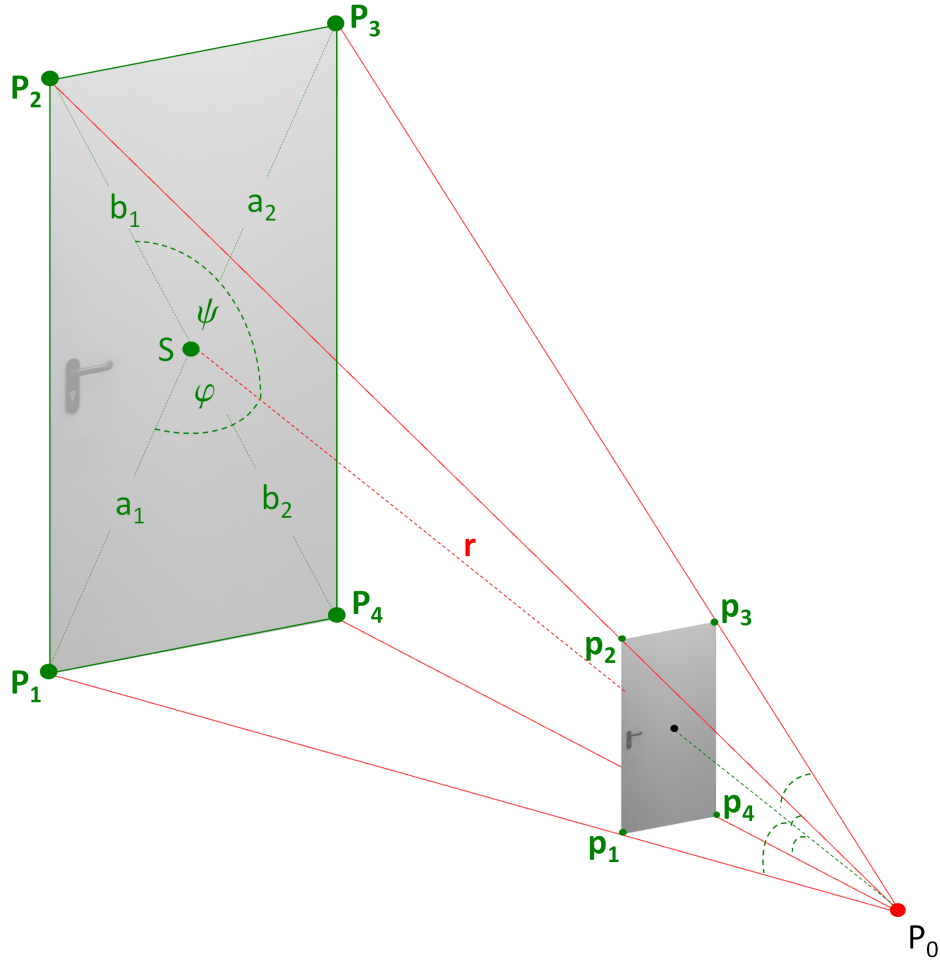


Abbildung 4.7: Bestimmungsstücke  $\varphi, \psi$  und Vektor  $\mathbf{r}$

Anhand der Winkel  $\varphi$  und  $\psi$  kann nun die Länge des Vektors  $\mathbf{r}$  bestimmt werden (siehe Abbildung 4.7).

$$\begin{aligned} r_1 &= \frac{a_1 \cdot \sin(\varphi + \alpha_1)}{\sin \alpha_1}, & r_2 &= \frac{a_2 \cdot \sin(\varphi + \alpha_2)}{\sin \alpha_2}, \\ r_3 &= \frac{b_1 \cdot \sin(\psi + \beta_1)}{\sin \beta_1}, & r_4 &= \frac{b_2 \cdot \sin(\psi + \beta_2)}{\sin \beta_2}. \end{aligned} \quad (4.33)$$

Die Länge von  $\mathbf{r}$  ist 4-fach überbestimmt (siehe (4.33)). Im Idealfall liefern alle vier Lösungen für  $r$  identische Werte. Abweichungen bei realen Messdaten führen jedoch zu unterschiedlichen Ergebnissen bei der Bestimmung von  $r$ . Prinzipiell ist nach Killian (1955) eine einfache Mittelung aller Lösungen für  $r$  ausreichend (4.34).

$$r = \frac{r_1 + r_2 + r_3 + r_4}{4} \quad (4.34)$$

Um mögliche unterschiedliche Einflüsse der Konfiguration in Zusammenhang mit Messabweichungen bei der Bestimmung von  $r$  zu berücksichtigen, wird in Killian (1955) vorgeschlagen,  $r_1 \dots r_4$  gewichtet zu mitteln. Die Gewichte werden anhand der Standardabweichungen  $\sigma_i$  ( $i = 1 \dots 4$ ) (4.36) der

einzelnen Funktionen (4.35) berechnet. Dazu werden die einfachen Mittelwerte von  $r_0, \varphi_0, \psi_0$  als Näherungslösungen angenommen. Die abgeleiteten Parameter  $\{\alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2, a_1, a_2, b_1, b_2\}$  werden zur Vereinfachung als Beobachtungsgrößen eingeführt und die Gleichungen in (4.33) wie folgt formuliert:

$$\begin{aligned} f_1 &= r \cdot \sin \alpha_1 - a_1 \cdot \sin(\varphi + \alpha_1) = 0, \\ &\vdots \\ f_4 &= \dots \end{aligned} \tag{4.35}$$

Die Standardabweichungen  $\sigma_i$  werden über Taylor-Reihenentwicklung bestimmt zu:

$$\begin{aligned} \sigma_1^2 &= \left( \frac{\delta f_1}{\delta \alpha_1} \bigg|_0 \right)^2 \cdot \sigma_{\alpha_1}^2 + \left( \frac{\delta f_1}{\delta a_1} \bigg|_0 \right)^2 \cdot \sigma_{a_1}^2, \\ &\vdots \\ \sigma_4^2 &= \dots \end{aligned} \tag{4.36}$$

Zur Vereinfachung werden in Killian (1955) die Parameter  $a_1, a_2, b_1, b_2$  als fehlerfreie Größen eingeführt und die Abweichungen der Winkelgrößen gleich groß angenommen ( $\sigma_{\alpha_1} = \sigma_{\alpha_2} = \sigma_{\beta_1} = \sigma_{\beta_2} = 1$ ). Somit hängen die resultierenden Gewichte  $p_i = \frac{1}{\sigma_i^2}$  ( $i = 1 \dots 4$ ) für die gewichtete Mittelbildung der  $r_i$  nur noch von den Differentialquotienten ab.

Die Bestimmung der Position der Kamera im übergeordneten Koordinatensystem erfolgt nun entweder über räumlichen Vorwärtsschnitt oder räumliches polares Anhängen. Anschließend können die Drehwinkel wie auch bei den 3-Punkt-Algorithmen über eine Transformation bestimmt werden.

### 4.3 Konfigurationsuntersuchung

Alle drei beschriebenen Verfahren werden in der Photogrammetrie grundsätzlich nur als Näherungslösungen betrachtet. In den folgenden Untersuchungen wurden sie dennoch auf ihre Anwendbarkeit für den Prozess der Indoor-Positionierung untersucht, da ihr Genauigkeitspotenzial für diese Anwendung ausreichend sein könnte.

Dazu wird ein Testdatensatz simuliert. Abbildung 4.8 gibt eine Übersicht zum Ablauf der Generierung der Testdaten. Vorgegeben sind die Eckpunkte einer Tür im Objektkoordinatensystem  $(X, Y, Z)_n$  sowie die äußere Orientierung der Kamera, d. h. die Rotationsmatrix  $\mathbf{R}_{\omega\varphi\kappa_i}$  und das Projektionszentrum  $\mathbf{P}_{0i}$  im Objektkoordinatensystem. Die  $\mathbf{P}_{0i}$  sind in einem Raster mit  $4m \times 4m$  mit einem Rasterabstand von  $0,5m \times 0,5m$  in drei Abständen ( $3m, 5m, 7m$ ) zur simulierten Tür vorgegeben. Die Rotationswinkel  $(\omega_i, \varphi_i, \kappa_i)$  werden jeweils so festgelegt, dass jeweils ein  $\mathbf{P}_{0i}$ , der Bildhauptpunkt der Kamera  $\mathbf{H}'$  und der Diagonalschnittpunkt im Objektkoordinatensystem  $\mathbf{S}$  auf einer Geraden liegen (siehe Abbildung 4.9). Mit den vorgegebenen äußeren Orientierungen und einer vorgegebenen inneren Orientierung werden über die Kollinearitätsgleichungen die Bild- und Sensorkoordinaten der korrespondierenden Türeckpunkte im

Bild berechnet. So werden insgesamt 243 Beispieldatensätze erzeugt und daraus die Positionen mit allen drei Ansätzen bestimmt.  $\tilde{\mathbf{P}}_{0i}$  und  $\tilde{\mathbf{R}}_{\omega\varphi\kappa_i}$  in Abbildung 4.8 entsprechen den mittels den Algorithmen berechneten 6 DOF, die teilweise von der wahren äußeren Orientierung  $\mathbf{P}_{0i}$  und  $\mathbf{R}_{\omega\varphi\kappa_i}$  abweichen können.

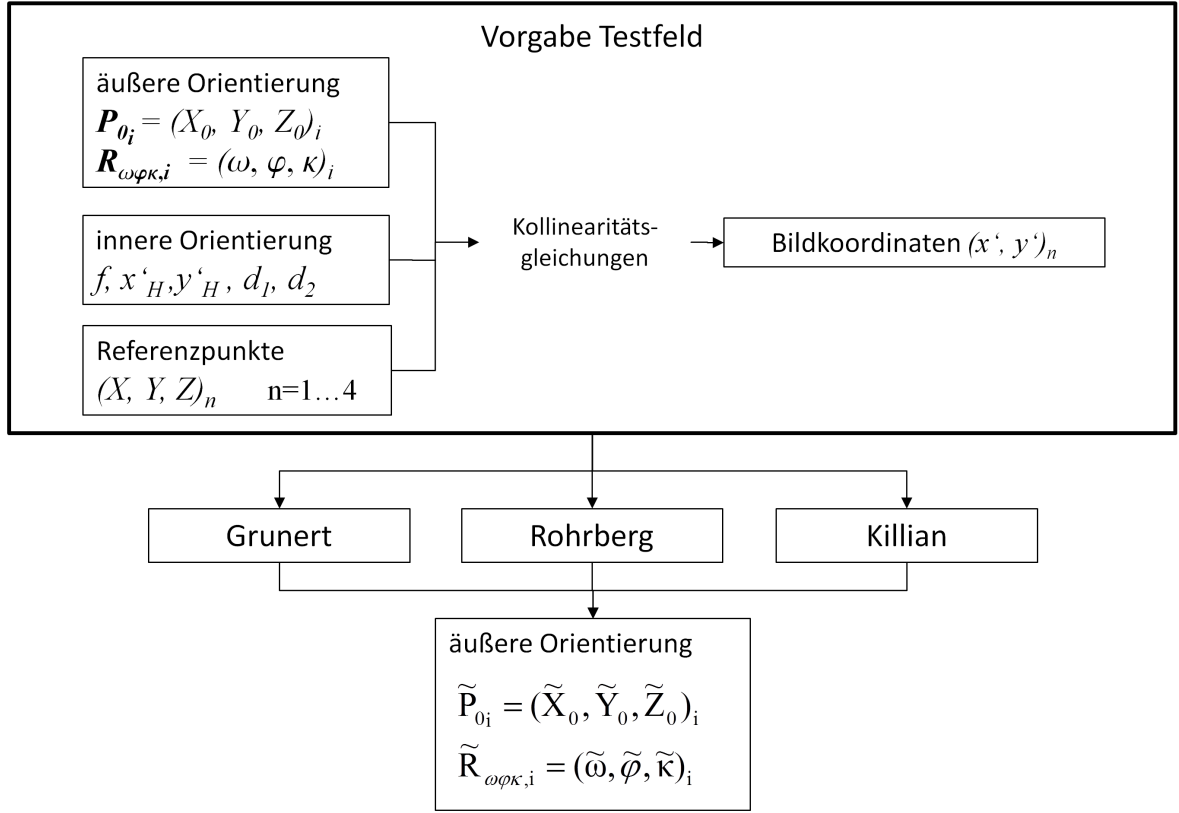


Abbildung 4.8: Generierung von Testdaten

Befindet sich  $\mathbf{P}_0$  zusammen mit drei Referenzpunkten  $\mathbf{P}_n$  auf einer gemeinsamen Zylinder-Mantelfläche, kann die Lösung anhand der 3-Punkt-Algorithmen nur unsicher bestimmt werden (vgl. Haralick et al. (1994) oder Wrobel (2001)). Diese Fläche wird in der Literatur als *gefährlicher Zylinder* bezeichnet. Das Testszenario sowie der gefährliche Zylinder sind in Abbildung 4.9 dargestellt. Weiterhin kann die äußere Orientierung nur unsicher bestimmt werden, wenn alle Referenzpunkte und das Projektionszentrum in einer Ebene liegen. Dieser Fall kann bei der hier vorgestellten Anwendung zur Indoorpositionierung jedoch nicht auftreten, da der Nutzer in diesem Fall in der Wand stehen würde.

Zunächst werden alle Datensätze fehlerfrei eingeführt, so dass die Algorithmen hinsichtlich ihrer Stabilität gegenüber der Konfiguration sowie ihrer Rechenzeit getestet werden können. Die Ergebnisse sind in Tabelle 4.1 gegenübergestellt.

Zur Bewertung der Robustheit der Positionsbestimmung mit den einzelnen Algorithmen werden die maximalen Koordinatenklaffungen  $d_X, d_Y, d_Z$  sowie die Punktabweichung

$$d_P = \sqrt{d_X^2 + d_Y^2 + d_Z^2} \quad (4.37)$$

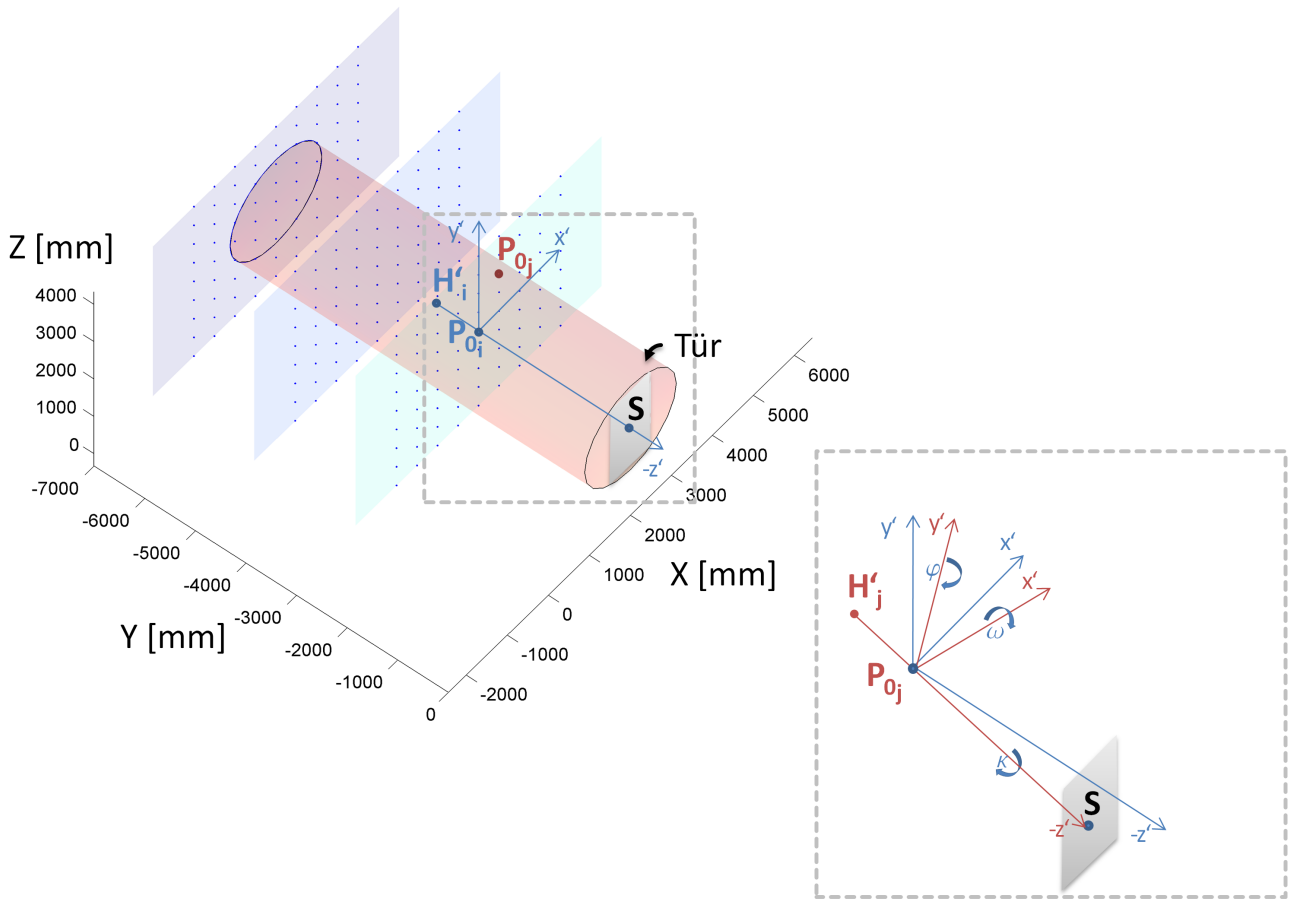


Abbildung 4.9: Simuliertes Szenario mit gefährlichem Zylinder; links: Gesamtdarstellung des Testfeldes, rechts: Detailansicht zur Veranschaulichung der Rotationswinkel

	Grunert	Rohrberg	Killian
Zeit [sec]	5	258	3
Anzahl $d_P > 1$ mm	5	19	0
max. $d_\omega$ [°]	0,01	42,31	0
max. $d_\varphi$ [°]	0,02	41,67	0
max. $d_\kappa$ [°]	0,01	9,20	0
max. $d_X$ [mm]	1,90	3632	0
max. $d_Y$ [mm]	0,60	152	0
max. $d_Z$ [mm]	0,70	3718	0

Tabelle 4.1: Vergleich der Algorithmen bei unverrauschten Daten (Maxima und Zeit beziehen sich jeweils auf alle 243 Datensätze)

berechnet. Für die Bewertung der Stabilität der Orientierungsbestimmung anhand der einzelnen Algorithmen werden die maximalen Winkelabweichungen  $d_\omega$ ,  $d_\varphi$ ,  $d_\kappa$  bestimmt. Die Abweichungen der Rotationswinkel ( $\omega$ ,  $\varphi$ ,  $\kappa$ ) sind abhängig von der Abweichung der jeweiligen Position  $\mathbf{P}_{0i}$ , da die Rotationswinkel in Ab-

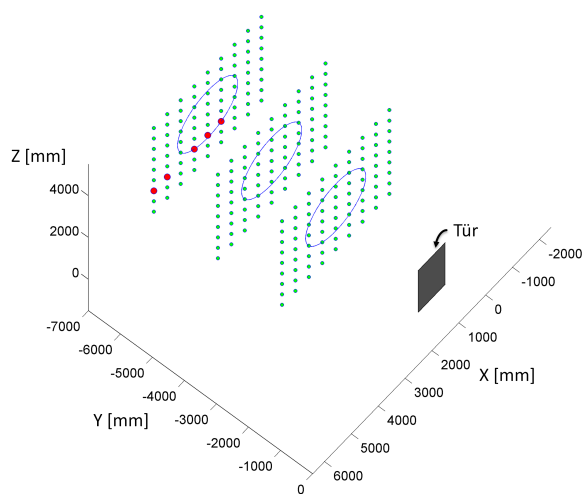
hängigkeit der nun 5 Punktkorrespondenzen  $\mathbf{P}_i, \mathbf{p}_i$ ,  $i = 0 \dots 4$  berechnet werden. Die roten Kugeln in Abbildung 4.10 stellen berechnete Punkte dar, deren Punktabweichung  $d_P > 1 \text{ mm}$  ist, die grünen Kugeln zeigen berechnete Punkte mit  $d_P < 1 \text{ mm}$ .

Mit 3 bzw. 5 sec Rechenzeit sind die Ansätze nach Grunert (1841) und Killian (1955) deutlich schneller als der Ansatz nach Rohrberg (2009). Auch bei Betrachtung der maximalen Abweichung, die bei den Algorithmen auftritt, zeigt sich, dass der Ansatz nach Rohrberg deutlich fehleranfälliger ist. Das liegt daran, dass die Nullstellen der Funktionszweige bei der Rohrberg-Methode anhand numerischer Methoden bestimmt werden. Bei ungünstigen Konfigurationen treten bei den Funktionszweigen gehäuft Nullstellen an den Grenzen der Definitionsintervalle auf. Hier kann das eingesetzte Newton-Verfahren trotz Erweiterung der Intervallgrenzen keine exakten Lösungen mehr liefern.

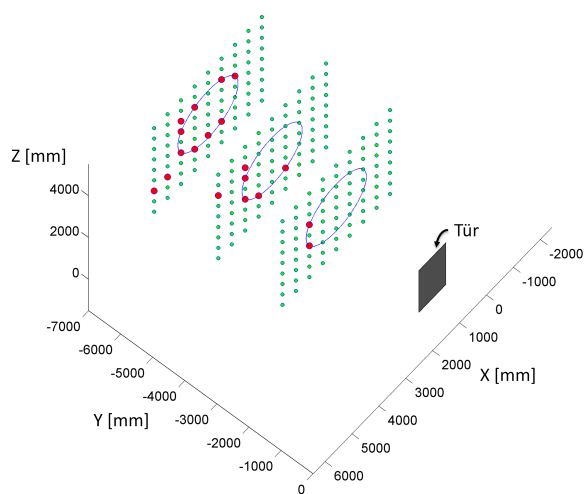
Auch beim Verfahren nach Grunert (1841) treten vereinzelt geringe Abweichungen (ca. 2 mm) bei der Positionsbestimmung auf. Prinzipiell handelt es sich hier um einen rein analytischen Ansatz. Allerdings ist die analytische Methode aufwendig in der Berechnung. Außerdem kann das Polynom vierten Grades (4.19) aufgrund der begrenzten Rechenschärfe des Programmsystems anhand rein analytischer Methoden nicht immer gelöst und so nicht alle Positionen im Testfeld bestimmt werden. Daher erfolgt die Auflösung des Polynoms (4.19) numerisch (`roots()` - Funktion in Matlab). Dadurch können zwar alle Positionen bestimmt werden, allerdings treten bei schlechten Konfigurationen teilweise Unschärfen bei der Berechnung der Lösung auf (vgl. Tabelle 4.1).

Betrachtet man in Abbildung 4.10 die Verteilung der Abweichungen für die 3-Punkt-Algorithmen, scheinen diese ausschließlich auf der linken Seite des Rasters aufzutreten. Es kann hierbei jedoch nicht auf eine Systematik geschlossen werden. Die Abweichungen ergeben sich aufgrund der im Vorfeld mit begrenzter Rechenschärfe bestimmten Ausgangskordinaten und können bei wiederholter Bestimmung ebenso auf der rechten Seite des Rasters auftreten.

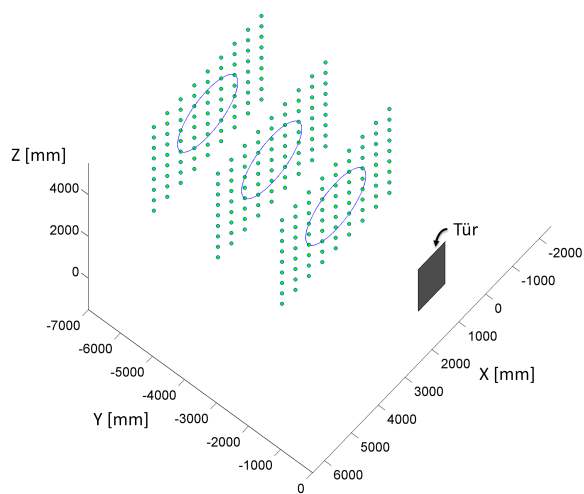
Im Gegensatz zu den beiden 3-Punkt-Algorithmen liefert der Ansatz nach Killian im Simulationsfall die besten Ergebnisse. Durch direkte Verwendung des vierten Punktes können die Bestimmungsstücke der Pyramide analytisch abgeleitet werden. Somit kann die Positionslösung robuster bestimmt werden und wird nicht durch schlechte Konfigurationen beeinflusst.



(a) Grunert



(b) Rohrberg



(c) Killian

Abbildung 4.10: Vergleich der drei Ansätze; rote Kugeln: Punktabweichung  $d_P > 1$  mm, grüne Kugeln: Punktabweichung  $d_P < 1$  mm

## 5 Theoretisch erreichbare Genauigkeiten der bildbasierten Positionsbestimmung

In Abschnitt 4.1 wurde bereits der Zusammenhang zwischen korrespondierenden Bild- und Objektkoordinaten sowie der intrinsischen Parameter anhand der Kollinearitätsgleichungen (4.4) und (4.5) dargestellt. Aus diesem Zusammenhang können die 6 Parameter der äußeren Orientierung (6 DOF) berechnet werden. Aus den Gleichungen geht hervor, dass die Genauigkeit der 6 DOF sowohl von den intrinsischen Parametern als auch von der Genauigkeit der korrespondierenden Punkte in Bild- und Objektkoordinatensystem abhängt. Die Qualität der Positionslösung hängt insgesamt von vier Einflussfaktoren ab:

1. Konfiguration der Pyramide, die vom Projektionszentrum und den Türeckpunkten gebildet wird
2. Intrinsische Parameter  $f$ ,  $x'_H$ ,  $y'_H$  sowie radiale Verzeichnungsparameter  $d_1$ ,  $d_2$
3. Qualität der Bildkoordinaten  $p'_i = (x'_i, y'_i)$
4. Qualität der korrespondierenden Objektkoordinaten  $P_i = (X_i, Y_i, Z_i)$ .

Die Untersuchungen beschränken sich im Folgenden ausschließlich auf die Position  $(X_0, Y_0, Z_0)$ . Auswirkungen auf die Rotationswinkel  $(\omega, \varphi, \kappa)$  werden hier nicht näher betrachtet, da sich die Arbeit auf die Positionsbestimmung einer Person konzentriert.

Mit Abweichungen behaftete Größen (z. B.  $\tilde{p}'_i$  oder  $\tilde{P}_i$ ) werden in dieser Arbeit ausnahmsweise mit '  $\sim$  ' gekennzeichnet. Der Einfluss der Konstellation auf die Positionslösung wurde bereits in Haralick et al. (1994) und für die in dieser Arbeit verwendeten Ansätze in Kapitel 4 untersucht. Im Falle fehlerfreier Bild- und Objektkoordinaten  $(x'_i, y'_i, X_i, Y_i, Z_i)$  liefern die Ansätze stabile Lösungen. In der Praxis allerdings sind die Messungen, sowohl in den Bild  $(\tilde{x}'_i, \tilde{y}'_i)$ - als auch in den Objektkoordinaten  $(\tilde{X}_i, \tilde{Y}_i, \tilde{Z}_i)$ , mit Abweichungen behaftet.

Daher wird im Folgenden untersucht, wie genau die Bild- und Objektkoordinaten der Referenzpunkte bestimmt werden müssen, um die Position mit einer Punktabweichung  $< 1$  m bestimmen zu können. Die Genauigkeit der Bildpunkte wird einerseits durch zufällige Abweichungen beeinflusst, andererseits durch die Genauigkeit der Parameter der inneren Orientierung der Kamera. Daher muss ebenfalls untersucht werden, welchen Einfluss die innere Orientierung der Kamera auf die Bildkoordinaten hat.

Eine direkte Ableitung der Genauigkeit über das allgemeine Varianzfortpflanzungsgesetz ist theoretisch möglich. Der funktionale Zusammenhang ist über die Kollinearitätsgleichungen (4.4) und (4.5) gegeben. Da der funktionale Zusammenhang nichtlinear ist, müssen zunächst Näherungswerte  $(P_0, R_0)$  für die Position

und die Rotation für die Fehlerabschätzung vorliegen. Diese können anhand des Ansatzes nach Killian bestimmt werden. Das Problem bei diesem Vorgehen ist, dass die analytischen Ableitungen  $\frac{\delta x'}{\delta X_0}$ ,  $\frac{\delta x'}{\delta Y_0}$ ,  $\frac{\delta x'}{\delta Z_0}$  bzw.  $\frac{\delta y'}{\delta X_0}$ ,  $\frac{\delta y'}{\delta Y_0}$ ,  $\frac{\delta y'}{\delta Z_0}$  sehr komplex sind, wenn alle Einflussgrößen berücksichtigt werden sollen. Dies liegt unter anderem daran, dass die Bildkoordinaten  $(x'_i, y'_i)$  wiederum abgeleitete Größen aus den Sensorkoordinaten und den intrinsischen Parametern sind (vgl. (4.1) und (4.2)).

Daher wird die Auswirkung von Messabweichungen in den Beobachtungsgrößen auf die Positionslösung anhand von Monte Carlo Simulationen (MacKay, 2003) empirisch untersucht. Um die Varianz anhand von Monte Carlo Simulationen zufriedenstellend bestimmen zu können, muss eine sehr große Stichprobe ( $\geq 1000$ ) simuliert werden. Für die Untersuchungen wird das in Abbildung 4.9 dargestellte Testszenario verwendet. Dabei werden nur 100 Simulationen durchgeführt, da der Einfluss der Beobachtungsgrößen zunächst nur grob abgeschätzt werden soll.

Zwischen Sensor- und Bildkoordinaten besteht ein funktionaler Zusammenhang über die intrinsischen Parameter  $(f, x'_H, y'_H, d_1, d_2)$ . Daher wird zunächst der Einfluss der inneren Orientierung auf die Bildkoordinaten analytisch abgeleitet (Abbildung 5.1).

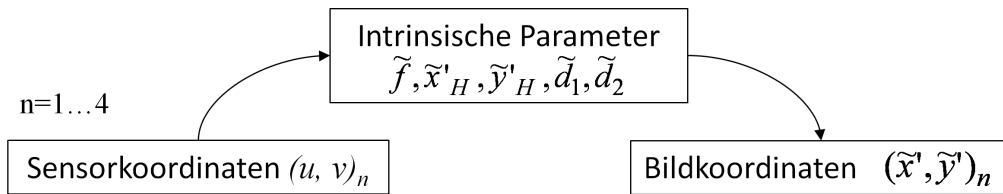


Abbildung 5.1: Funktionaler Zusammenhang zwischen Sensor- und Bildkoordinaten

Als nächstes werden die aus dem vorgegebenen Testfeld bestimmten Beobachtungen  $(\tilde{x}', \tilde{y}')_n$  ( $n = 1 \dots 4$ ) mit Gauß'schem Rauschen (`randn()`-Funktion in Matlab) behaftet und davon ausgehend die Position  $\tilde{P}_{0i}$  mit den unterschiedlichen Ansätzen, die in Kapitel 4 beschrieben wurden, berechnet (Abbildung 5.2).

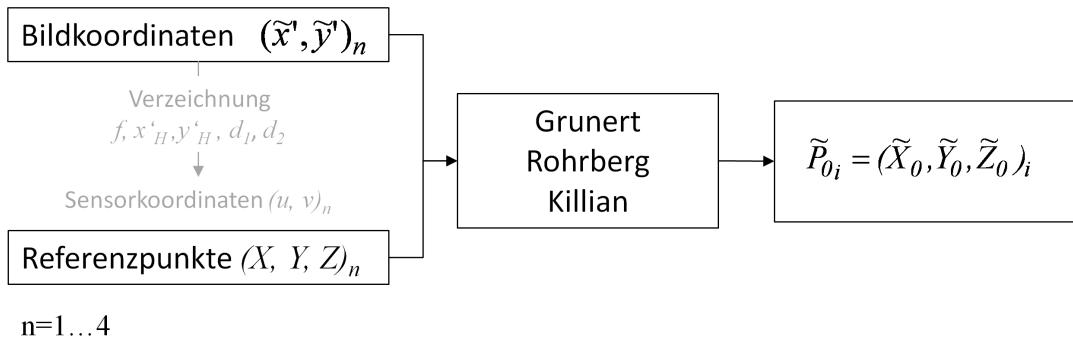
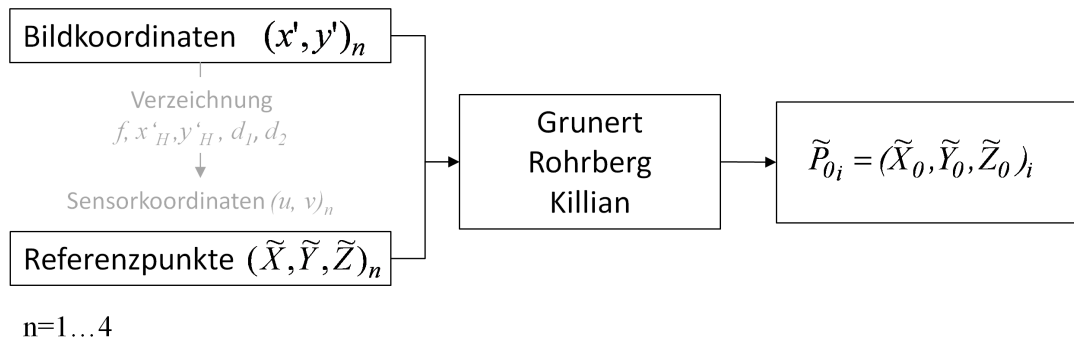


Abbildung 5.2: Berechnung der Position mit verrauschten Bildkoordinaten  $(\tilde{x}', \tilde{y}')_n$

Zuletzt wird wieder das ursprüngliche Testfeld (Abbildung 4.8) verwendet und dieses Mal auf die Objektkoordinaten  $(\tilde{X}, \tilde{Y}, \tilde{Z})_n$  Gauß'sches Rauschen addiert und wieder  $\tilde{P}_{0i}$  berechnet (Abbildung 5.3).




Abbildung 5.3: Berechnung der Position mit verrauschten Objektkoordinaten  $(\tilde{X}, \tilde{Y}, \tilde{Z})_n$ 

## 5.1 Innere Orientierung

Die innere Orientierung stellt die Beziehung zwischen gemessenen Sensorkoordinaten und verzeichnungsfreien, korrigierten Kamerakoordinaten her:

$$u_i = x'_H + x'_i \cdot (1 + d_1 \cdot (x_i'^2 + y_i'^2) + d_2 \cdot (x_i'^2 + y_i'^2)^2) \quad (5.1)$$

$$v_i = y'_H + y'_i \cdot (1 + d_1 \cdot (x_i'^2 + y_i'^2) + d_2 \cdot (x_i'^2 + y_i'^2)^2). \quad (5.2)$$

Abweichungen der inneren Orientierung beeinflussen daher zunächst die Genauigkeit der Bildkoordinaten. Mittels der *Methode der kleinsten Quadrate* (MkQ) wird die Standardabweichung der verzeichnungsfreien Bildkoordinaten für ein Bild der Größenordnung 1600 px  $\times$  1600 px ausgerechnet. Die Parameter der inneren Orientierung werden mit im Vorfeld empirisch bestimmten Werten und Genauigkeiten eingeführt (Tabelle 5.1).

Parameter	$f$	$x'_H$	$y'_H$	$d_1$	$d_2$
<b>Wert</b>	5,89 mm	2,81 mm	2,10 mm	−0,0041	0,0004
<b>Std.abw.</b>	3,6 $\mu$ m	1,5 $\mu$ m	1,2 $\mu$ m	0,0001	0,000007

Tabelle 5.1: Kalibrierdaten der intrinsischen Parameter

Abbildung 5.4 zeigt den analytisch abgeleiteten Helmert'schen Punktfehler

$$\sigma_{p'} = \sqrt{\sigma_{x'}^2 + \sigma_{y'}^2} \quad (5.3)$$

der Bildkoordinaten  $(\tilde{x}'_i, \tilde{y}'_i)$ . An den Bildrändern wird  $\sigma_{p'}$  mit einem Wert von 8,9  $\mu$ m, bzw. 5 px maximal. Um die Auswirkung auf die Genauigkeit der Positionsbestimmung ausschließlich in Abhängigkeit der inneren Orientierung zu ermitteln, werden für jeden Punkt des Testszenarios (Abbildung 4.9) 100 Testdaten für korrespondierende Bild- und Objektkoordinaten erzeugt, wobei die Bildkoordinaten  $(\tilde{x}'_i, \tilde{y}'_i)$  von den Sensorkoordinaten  $(u_i, v_i)$  und mit Gauß'schem Rauschen behafteter innerer Orientierung abgeleitet werden. Mit den so gewonnenen Testdaten wird die Position in jedem Punkt 100 mal berechnet und

daraus die empirische Standardabweichung der Koordinaten zur Beurteilung der inneren Genauigkeit abgeleitet.

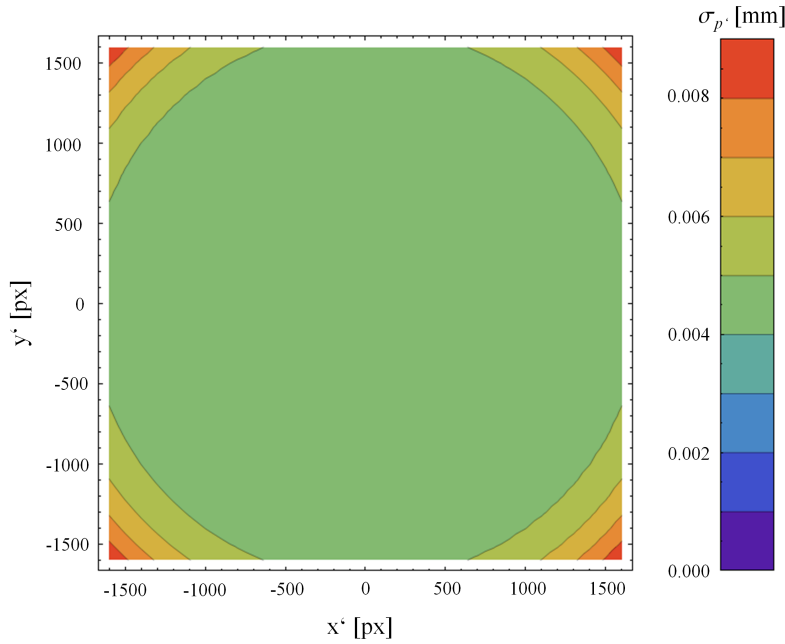


Abbildung 5.4: Einfluss der intrinsischen Parameter auf die Bildkoordinaten

So führt ein Rauschen der inneren Orientierung mit den in Tabelle 5.1 angegebenen Standardabweichungen zu einem maximalen Helmert'schen Punktfehler

$$s_P = \sqrt{s_X^2 + s_Y^2 + s_Z^2} \quad (5.4)$$

in der Position  $\tilde{P}_0$  von  $s_P = 13,37$  cm bzw.  $s_P = 19,1$  cm bei Anwendung der 3-Punkt-Algorithmen (Grunert, 1841; Rohrberg, 2009). Mit dem 4-Punkt-Algorithmus (Killian, 1955) beträgt der Helmert'sche Punktfehler maximal  $s_P = 0,021$  cm. Die mittlere Punktabweichung

$$d_P = \sqrt{d_X^2 + d_Y^2 + d_Z^2} \quad (5.5)$$

(Maß der äußeren Genauigkeit) liegt bei den 3-Punkt-Algorithmen im schlechtesten Fall bei  $d_P = 104,1$  cm (Grunert, 1841) bzw.  $d_P = 178,2$  cm (Rohrberg, 2009). Der 4-Punkt-Algorithmus ermöglicht genauere Ergebnisse mit einer maximalen mittleren Punktabweichung von  $d_P = 0,05$  cm. Bereits hier wird deutlich, dass der Ansatz nach Killian (1955) robuster gegenüber Messabweichungen ist als die beiden 3-Punkt-Ansätze.

## 5.2 Bildkoordinaten

Besonders die Genauigkeit der Bildkoordinaten, die durch die automatisierte Detektion der Bildpunkte (Kapitel 7) vorgegeben wird, hat einen großen Einfluss auf die Genauigkeit der geschätzten Position  $\tilde{P}_0$ . Zur

Untersuchung des Einflusses der Bildkoordinaten wird  $\tilde{P}_0$  für einen Punkt des Testfeldes  $P_0 = (3/5/1,50)$  m (in Abbildung 5.7 markiert) mit den unterschiedlichen Algorithmen und mit Gauß'schem Rauschen behafteten Daten mit zunehmender Standardabweichung  $s_0$  jeweils 100 mal berechnet. Um die Abweichungen zu beurteilen, wird sowohl der Helmert'sche Punktfehler  $s_P$  als auch die mittlere Punktabweichung  $d_P$  bei wachsendem Rauschen aufgetragen (Abbildungen 5.5 und 5.6).

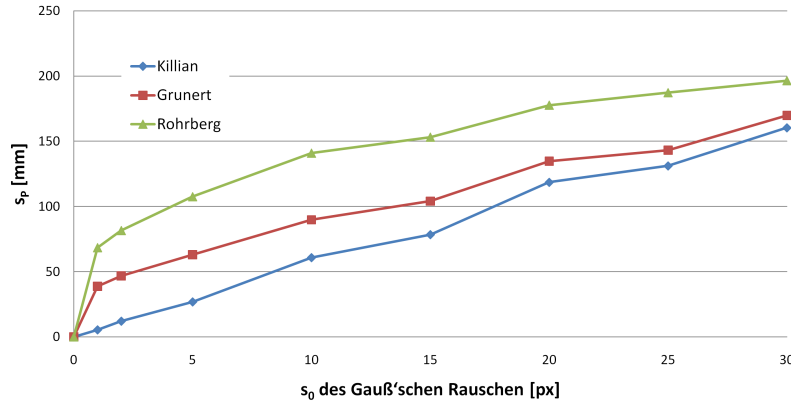


Abbildung 5.5: Helmert'scher Punktfehler  $s_P$  für Lösungen des räumlichen Rückwärtsschnitts bei verrauschten Daten

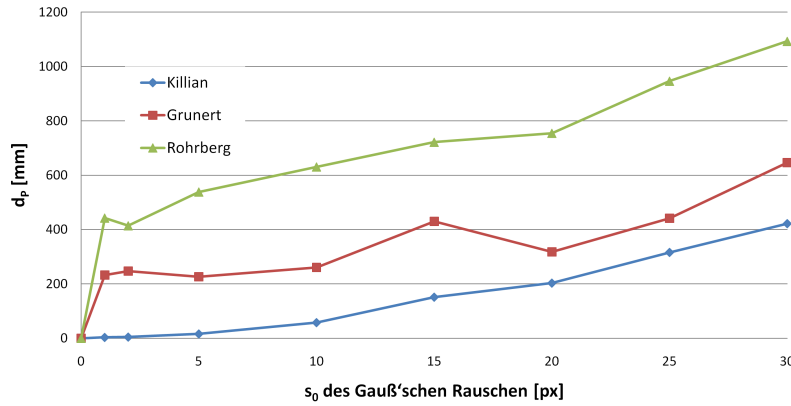


Abbildung 5.6: Mittlere Punktabweichung  $d_P$  für Lösungen des räumlichen Rückwärtsschnitts bei verrauschten Daten

Beim 4-Punkt-Ansatz nimmt der Helmert'sche Punktfehler  $s_P$  über den gesamten Bereich von  $s_0$  annäherungsweise linear zu. Bei den 3-Punkt Ansätzen ist dieser Zusammenhang erst bei einem Gauß'schen Rauschen von  $s_0 > 1$  px annähernd linear. Insgesamt fällt  $s_P$  unter Anwendung des Ansatzes nach Killian (1955) immer kleiner aus als für die Ansätze nach Grunert (1841) und Rohrberg (2009). Folglich ist der Ansatz nach Killian (1955) am robustesten gegenüber verrauschten Bilddaten. Betrachtet man den Verlauf der mittleren Punktabweichung  $d_P$  in Abbildung 5.6, erkennt man ebenfalls eine Zunahme mit wachsendem Rauschen in allen 3 Algorithmen. Für die 3-Punkt-Algorithmen nimmt  $d_P$  schneller zu als für den Ansatz nach Killian (1955) und zeigt schon bei Abweichungen  $< 2$  px in den Bildkoordinaten einen sprunghaften Anstieg. Dieser Offset erklärt sich dadurch, dass die verrauschten 2D-Koordinaten anhand der Rückwärtsschnitt-Algorithmen rückprojiziert werden, d. h. durch eine nichtlineare Transformation

auf die 3D-Koordinaten abgebildet werden und dadurch die Verteilung der geschätzten Position  $\tilde{P}_0$  nicht mehr Gauß-verteilt ist.

Da der Ansatz nach Killian (1955) sowohl bzgl. des Helmert'schen Punktfehlers als auch der mittleren Punktabweichung bessere Ergebnisse liefert als die 3-Punkt-Algorithmen nach Grunert (1841) und Rohrberg (2009), werden im Folgenden die Ergebnisse nur bezogen auf den 4-Punkt-Algorithmus vorgestellt. Die Abbildungen 5.5 und 5.6 zeigen, dass Abweichungen in den Bildkoordinaten mit  $s_0 = 30$  px bei einer Sensorfläche von  $3264 \times 2448$  px zu einem  $d_P = 0,42$  m und einem  $s_P = 0,16$  m führen. Die Bildkoordinaten müssen mit einer Genauigkeit von mindestens 10 px vorliegen, um eine gute Lösung für die Position zu erhalten. Eine Streuung in den Bildkoordinaten von 5 px ergibt eine mittlere Punktabweichung von  $d_P = 1,6$  cm mit einem Helmert'schen Punktfehler von  $s_P = 2,6$  cm.

Um den Einfluss verrauschter Messdaten in Kombination mit unterschiedlichen Konfigurationen auf die Positionslösung zu untersuchen, wird die Position für alle Punkte im Testfeld jeweils 100 mal mit dem Ansatz von Killian (1955) bestimmt. In Abbildung 5.7 sind die mittleren Helmert'schen Punktfehler  $s_{P_i}$  durch die Fehlerellipse dargestellt, die mittleren Punktabweichungen  $d_{P_i}$  durch die blauen Vektoren.

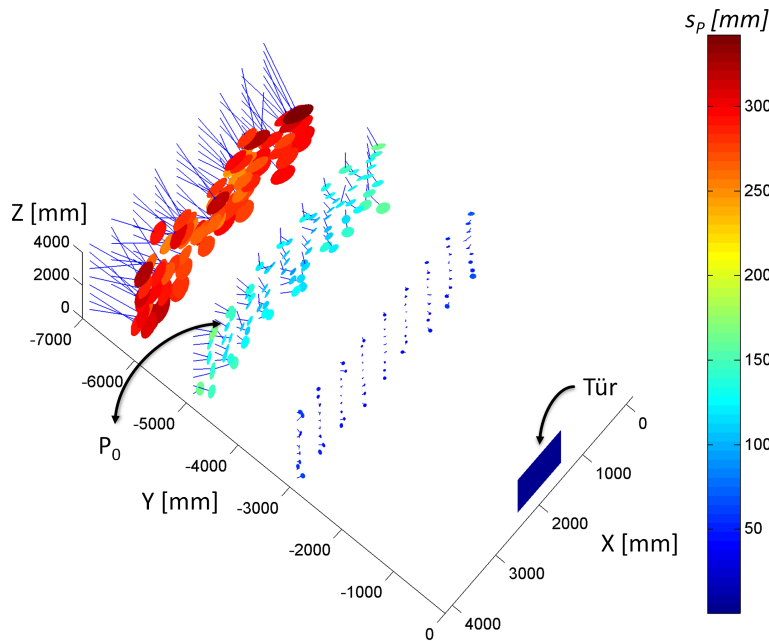


Abbildung 5.7: Varianzfortpflanzung der Gauß-verrauschten Bildkoordinaten mit  $s_0 = 20$  px auf die 3D-Position

Die Abweichungen bzw. die Helmerischen Punktfehler erreichen in größter Entfernung zur Tür ihren Maximalwert mit  $d_P = 1,20$  m und  $s_P = 0,34$  m. Sowohl  $d_P$  als auch  $s_P$  sind abhängig von der Konfiguration. Außerdem kann aus Abbildung 5.7 bereits der Schluss gezogen werden, dass eine systematische Abweichung vorliegt, die abhängig ist vom Abstand der Kamera zum Referenzobjekt. Wie bereits im Zusammenhang mit Abbildung 5.6 diskutiert wurde, ist die Abweichung bedingt durch die nichtlineare Abhängigkeit zwischen 2D- und 3D-Koordinaten, die bei allen Ansätzen des räumlichen Rückwärtsschnitts auftritt.

Für einzelne Punkte des Testfeldes werden daher Histogramme bezüglich der Abweichungen  $d_X$ ,  $d_Y$  und  $d_Z$  erzeugt, um die Verteilung der  $\tilde{P}_0$  zu visualisieren und Rückschlüsse auf die getroffenen Annahmen ziehen zu können (Abbildungen 5.8, 5.9, 5.10). Die Histogramme werden aus einem Datensatz mit 1000 Positionsbestimmungen erstellt, die Klassenanzahl beträgt immer 20.

Da die Projektion eine nichtlineare Transformation ist, ist auch die resultierende Verteilung der 3D-Koordinaten der geschätzten Position nicht mehr Gauß-verteilt. Die Verteilung bleibt unimodal aber asymmetrisch. Dies wird auch aus den Histogrammen ersichtlich. Während die Abweichungen in X-Richtung nur eine leichte positive Schiefe aufzeigt, ist die Schiefe in Y-Richtung stark negativ.

Vergleicht man die Histogramme der drei Positionen (Abbildung 5.8, 5.9 und 5.10), erkennt man weiterhin, dass die Asymmetrie mit zunehmender Distanz wächst. Dies liegt daran, dass sich die perspektive Transformation proportional zur Inversen der Distanz verhält (vgl. dazu Abbildung 5.7).

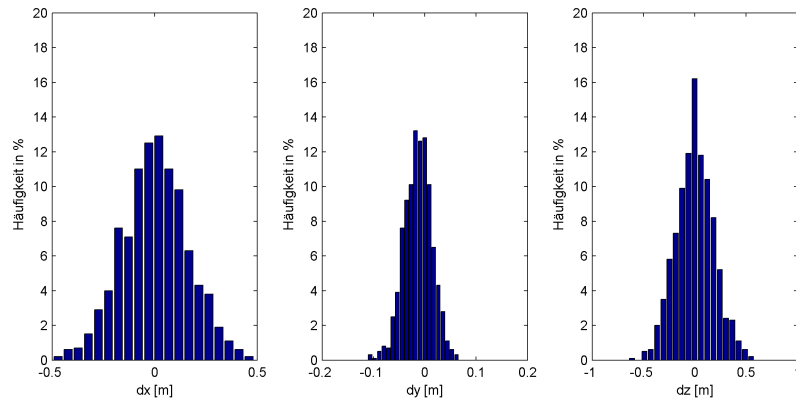


Abbildung 5.8: Histogramm für  $P_0 = (2/3/2) \text{ m}$

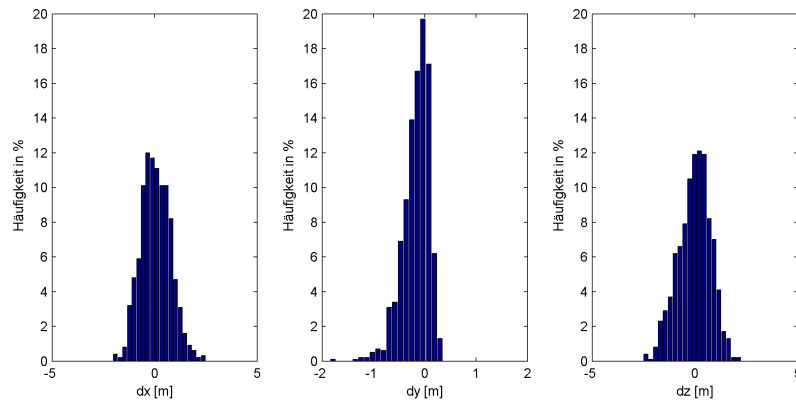


Abbildung 5.9: Histogramm für  $P_0 = (3/5/1,50) \text{ m}$

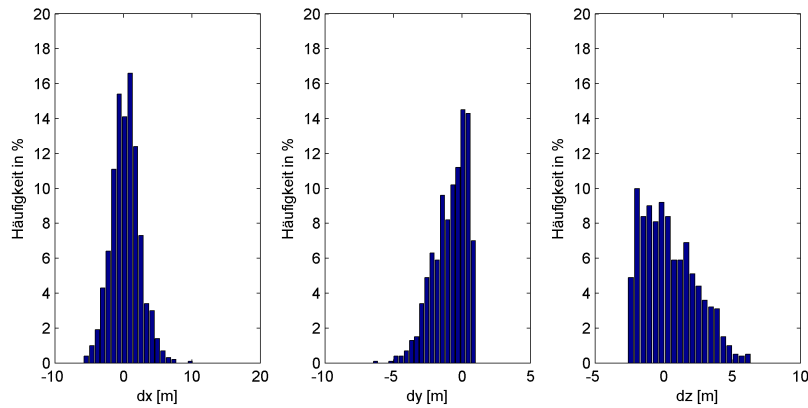


Abbildung 5.10: Histogramm für  $P_0 = (4/7/4) \text{ m}$

### 5.3 Objektkoordinaten

Die Genauigkeit der Objektkoordinaten ist davon abhängig, ob die Koordinaten der Türeckpunkte aus einem vorliegenden CAD-Modell entnommen werden oder ob sie direkt tachymetrisch eingemessen wurden. Bei einer Einmessung mittels Tachymeter kann von einer Genauigkeit von etwa 5 mm ausgegangen werden. Das Problem bei einer korrekten Bestimmung der Objektkoordinaten der Tür ist, einen eindeutigen Bezugspunkt zu definieren, da eine Türecke meist nicht eindeutig spezifiziert werden kann.

Um auch den Einfluss der Objektkoordinaten auf die Positionsgenauigkeit abzuschätzen, werden diese für ein worstcase - Szenario mit einer Standardabweichung von 20 mm verrauscht und ebenfalls für jeden Testfeldpunkt 100 mal die Position nach dem Ansatz von Killian (1955) berechnet und daraus  $\tilde{P}_0$  geschätzt. Abbildung 5.11 zeigt die Einflüsse der verrauschten Objektkoordinaten auf die Position anhand des mittleren Helmert'schen Punktfehlers  $s_P$  (Fehlerellipse) sowie der mittleren Punktabweichung  $d_P$  (blaue Vektoren).

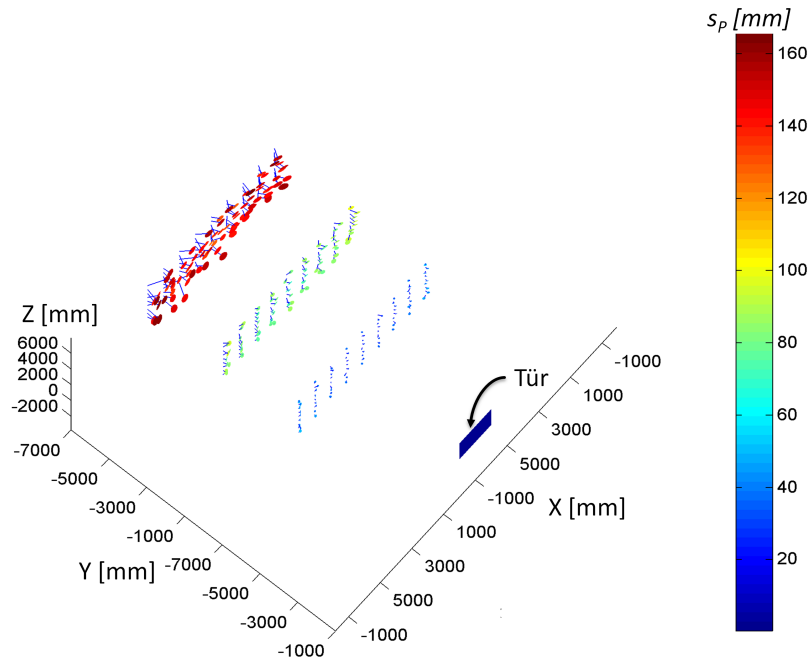


Abbildung 5.11: Varianzfortpflanzung der Gauß-verrauschten Objektkoordinaten mit  $s_0 = 20$  mm auf  $\tilde{P}_0$

Auch im Falle von verrauschten Objektkoordinaten nehmen sowohl  $d_P$  als auch  $s_P$  mit zunehmender Entfernung zum Objekt zu ( $d_P \leq 0,42$  m,  $s_P \leq 0,17$  m). Die Auswirkungen von verrauschten Objektkoordinaten mit  $s_0 = 20$  mm auf die mittlere Punktabweichung und den mittleren Helmert'schen Punktfehler sind vergleichbar mit den Auswirkungen bei 10 px Gauß-verrauschten Bildkoordinaten. Allerdings ist der Einfluss sowohl auf  $d_P$  als auch auf  $s_P$  kleiner als der von 20 px Gauß-verrauschten Bildkoordinaten (vgl. Abbildung 5.7).

Die Objektkoordinaten beeinflussen die Positionsgenauigkeit demnach nicht so stark wie die Bildkoordinaten, wenn davon ausgegangen wird, dass die Bildkoordinaten generell schlechter als 10 px und die Objektkoordinaten besser als 20 mm bestimmt werden. Ein Bias ist auch bei verrauschten Ob-

jektkoordinaten erkennbar. Allerdings fällt dieser um bis zu 0,80 m kleiner aus als bei verrauschten Bildkoordinaten.



## 6 Systemkalibrierung

Für die Bestimmung der Position anhand von 4 Punktkorrespondenzen muss die innere Orientierung der Kamera bekannt sein (Luhmann, 2010b). Diese wird vom Hersteller bei handelsüblichen Digitalkameras nur unzureichend angegeben. Bei der untersuchten Kamera Sony Ericsson C905 beschränken sich die Herstellerangaben auf die Brennweite  $f$ . Daher wird die Kamera im Vorfeld kalibriert, um sowohl die intrinsischen Parameter Brennweite  $f$  und Bildhauptpunkt  $H = (x'_H, y'_H)$  als auch die radialen Verzeichnungsparameter  $d_1$  und  $d_2$  zu bestimmen (Willert, 2009). Tangentiale Verzeichnungsparameter können wegen ihres geringen Einflusses gegenüber der radialen Verzerrung und aufgrund der angestrebten Genauigkeitsanforderungen bei den Untersuchungen vernachlässigt werden (Pedram et al., 2007). Für die Kalibrierung gibt es zwei unterschiedliche Ansätze, die Einzelbild- und die Mehrbildkalibrierung.

### 6.1 Einzelbildkalibrierung

Bei der Einzelbildkalibrierung können die Parameter der inneren und äußeren Orientierung einer Kamera bereits durch **eine** Aufnahme eines Kalibrierobjektes bestimmt werden.

Euklidische Koordinaten  $(X, Y, Z)^T$  bzw.  $(u, v)^T$  können durch Hinzufügen einer skalierbaren Komponente  $W \neq 0$  bzw.  $w \neq 0$  als homogene Koordinaten dargestellt werden.

Dadurch können korrespondierende Punkte im Objekt- und Bildkoordinatensystem durch Multiplikation mit einer  $3 \times 4$  - Matrix  $\mathbf{P}$

$$\mathbf{P} = \begin{pmatrix} p_1 & p_2 & p_3 & p_4 \\ p_5 & p_6 & p_7 & p_8 \\ p_9 & p_{10} & p_{11} & p_{12} \end{pmatrix} \quad (6.1)$$

in einen linearen Zusammenhang gebracht werden:

$$\begin{pmatrix} w \cdot u \\ w \cdot v \\ w \end{pmatrix} = \mathbf{P} \cdot \begin{pmatrix} W \cdot X \\ W \cdot Y \\ W \cdot Z \\ W \end{pmatrix}. \quad (6.2)$$

Die in homogener Form vorliegenden Kalibrierpunkte im Objektkoordinatensystem  $(W \cdot X, W \cdot Y, W \cdot Z, W)^T$  werden somit auf die korrespondierenden homogenen Bildpunkte  $(w \cdot u, w \cdot v, w)^T$  projiziert (6.2).

Vernachlässigt man die Skalierung, besitzt die Matrix  $\mathbf{P}$  noch 11 Freiheitsgrade ( $X_0, Y_0, Z_0, \omega, \varphi, \kappa, f, x'_H, y'_H, d_1, d_2$ ). Durch Umstellung des Gleichungssystems (6.2) wird ein lineares homogenes Gleichungssystem aufgestellt, das mit  $n \geq 6$  räumlich verteilten Punktpaaren gelöst werden kann.  $\mathbf{P}$  beinhaltet sowohl die innere als auch die äußere Orientierung der Kamera:

$$\mathbf{P} = \overbrace{\begin{pmatrix} f & f \cdot s & x'_H \\ 0 & f \cdot (1 + m) & y'_H \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}}^K \cdot \overbrace{\left( \begin{array}{ccc|c} r_{11} & r_{12} & r_{13} & X_0 \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & Y_0 \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & Z_0 \end{array} \right)}^{R|t}, \quad (6.3)$$

wobei

$s$  = Scherung in  $u$ - und  $v$ - Koordinatenrichtung

$m$  = Maßstabsverhältnis.

Lösungswege für die Bestimmung der Projektionsmatrix sind unter anderem in Förstner (2000) oder Pedram et al. (2007) aufgeführt.

Räumlich gut verteilte Referenzpunkte für die Einzelbildkalibrierung können durch einen Kalibrierkörper (siehe Abbildung 6.1) realisiert werden. Dabei dürfen die Punkte nicht alle in einer Ebene liegen. Sie sollten auf allen sichtbaren Flächen des Kalibrierwürfels verteilt sein.

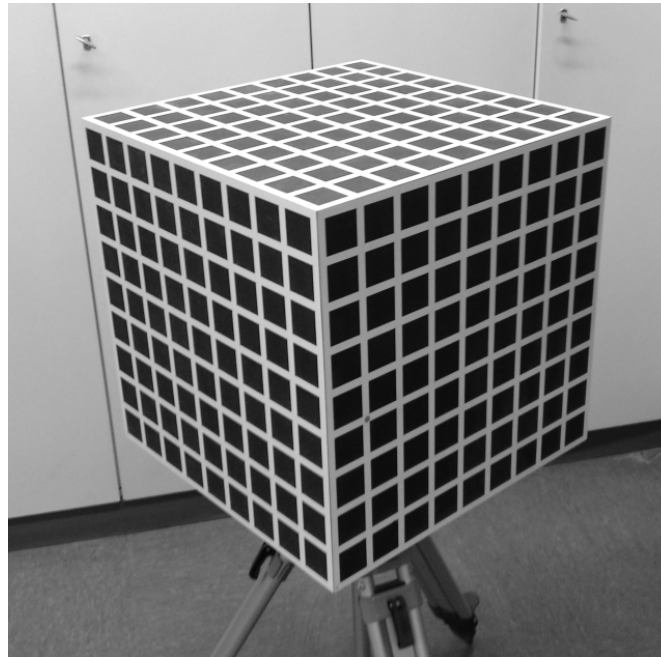


Abbildung 6.1: Kalibrierwürfel

Mit dem Einzelbildverfahren ist es zunächst nur möglich, Brennweite und Bildhauptpunkt zu bestimmen. Allerdings kann gerade bei Low-Cost-Kameras die radiale Verzeichnung die Bilddaten stark beeinflussen

und muss daher mitbestimmt werden. Durch iterative Prozessierung des Kalibrierverfahrens können die Verzeichnungsparameter aus den Residuen abgeleitet werden (Pedram et al., 2007). Allerdings setzt dies voraus, dass die Objektkoordinaten des Kalibrierkörpers möglichst fehlerfrei und die korrespondierenden Punkte räumlich gut verteilt sind. Um eine gute Schätzung für die 11 Parameter der inneren und äußeren Orientierung zu erhalten, müssen mindestens 28 Passpunkte verwendet werden (Hartley & Zisserman (2003), S. 182).

Um die Reproduzierbarkeit der Kalibrierergebnisse zu prüfen, werden anhand des Einzelbildkalibrierverfahrens die Kalibrierparameter der Digitalkamera C905 vier mal bestimmt. Die Passpunkte im Objektkoordinatensystem werden mit einem Kalibrierwürfel (Abbildung 6.1) realisiert. Die Passpunkte (Eckpunkte der schwarzen Quadratflächen) sind dazu im Vorfeld mittels Lasertracker bestimmt worden ( $s_P < 1$  mm). Die Ergebnisse sind in Tabelle 6.1 dargestellt.

Parameter	Messung 1 22.04.2009	Messung 2 02.07.2009	Messung 3 18.02.2010	Messung 4 19.02.2010	Mittel $\bar{x}$	Std.abw. $s_{x_i}$	rel. Gen. $r_s$
$f$ [mm]	5,82	5,80	5,78	5,77	5,79	0,02	0,35 %
$x'_H$ [mm]	2,82	2,77	2,79	2,78	2,79	0,02	0,73 %
$y'_H$ [mm]	2,01	2,05	2,06	2,06	2,04	0,02	1,11 %
$d_1$	0,1238	0,1873	0,2209	0,2526	0,1962	0,0551	28,10 %
$d_2$	-0,4401	-0,9783	-0,9341	-1,1921	-0,8862	0,3180	35,88 %

Tabelle 6.1: Ergebnisse aus Einzelbildkalibrierung C905

Die relative Genauigkeit  $r_s$  ist definiert über die Standardabweichung einer Einzelmessung  $s_{x_i}$  und den Mittelwert  $\bar{x}$  aus den vier Messungen (Niemeier, 2002):

$$r_s = \frac{s_{x_i}}{\bar{x}} \quad (6.4)$$

Die Werte der relativen Genauigkeit zeigen, dass die Brennweite wie auch der Bildhauptpunkt nur geringfügig schwanken (0,35 – 1,11 %). Für die Verzeichnungsparameter hingegen kann kein verlässlicher Wert ermittelt werden, die Schwankungsbreite liegt teilweise sogar in derselben Größenordnung wie der Mittelwert.

## 6.2 Mehrbildkalibrierung

Alternativ zur Einzelbildkalibrierung können die Orientierungsparameter einer Kamera auch bestimmt werden, indem ein ebenes Passpunktfeld von unterschiedlichen Kamerastandpunkten aus aufgenommen wird (Abbildung 6.2).

Den Zusammenhang der einzelnen Bilder liefern die Passpunkte, die allen Aufnahmen gemeinsam sind. Über diese können die einzelnen Bilder zueinander orientiert werden. Das mathematische Modell hierfür basiert

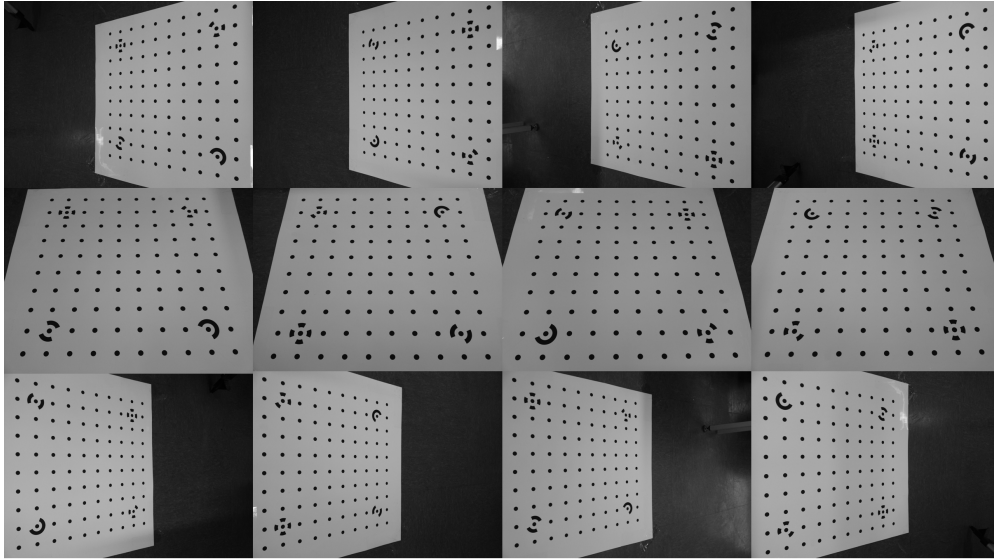


Abbildung 6.2: Aufnahmen eines planaren Testfelds für Mehrbildkalibrierung

auf den Kollinearitätsgleichungen, die für jedes Bild aufgestellt werden können.

$$u_i = x'_H + f \cdot \frac{r_{11j} \cdot (X_i - X_{0j}) + r_{21j} \cdot (Y_i - Y_{0j}) + r_{31j} \cdot (Z_i - Z_{0j})}{r_{13j} \cdot (X_i - X_{0j}) + r_{23j} \cdot (Y_i - Y_{0j}) + r_{33j} \cdot (Z_i - Z_{0j})} + \Delta x', \quad (6.5)$$

$$v_i = y'_H + f \cdot \frac{r_{12j} \cdot (X_i - X_{0j}) + r_{22j} \cdot (Y_i - Y_{0j}) + r_{32j} \cdot (Z_i - Z_{0j})}{r_{13j} \cdot (X_i - X_{0j}) + r_{23j} \cdot (Y_i - Y_{0j}) + r_{33j} \cdot (Z_i - Z_{0j})} + \Delta y', \quad (6.6)$$

wobei

$$\Delta x' = \Delta x'(d_{1,2}, u_i, v_i, x'_H, y'_H), \quad \Delta y' = \Delta y'(d_{1,2}, u_i, v_i, x'_H, y'_H),$$

$i$  = Punkindex,  $j$  = Bildindex.

Die Abweichungen aufgrund von Verzeichnung werden dabei mit  $\Delta x'$  und  $\Delta y'$  berücksichtigt. Diese sind abhängig von den Verzeichnungsparametern  $d_{1,2}$  sowie der Lage des Punktes im Bildkoordinatensystem.

Eine Möglichkeit zur Bestimmung der Parameter der inneren und äußeren Orientierungen liefert die Bündelausgleichung (Luhmann, 2010a). Dabei müssen zunächst Näherungswerte für die Orientierungsparameter eingeführt werden. Für die innere Orientierung können z. B. die Angaben des Herstellers genutzt werden. Die äußeren Orientierungsparameter können über räumlichen Rückwärtsschnitt genähert bestimmt werden. Anhand der Näherungswerte werden die Gleichungen (6.5) und (6.6) linearisiert, so dass alle Parameter ausgeglichen werden können.

Die Anzahl der benötigten Passpunkte hängt von der Anzahl der Bilder ab. Eine Minimalkonfiguration von 2 Bildern mit der gleichen Kamera ergibt insgesamt 17 Unbekannte. In diesem Fall müssen mindestens 9 identische Punkte in den beiden Aufnahmen vorliegen, um die äußeren und inneren Orientierungen der beiden Aufnahmen abzuleiten. In der Praxis werden jedoch weit mehr Aufnahmen herangezogen, um eine ausreichende Überbestimmung zu garantieren.

Für die Digitalkamera C905 werden anhand einer Mehrbildkalibrierung ebenfalls ihre intrinsischen Parameter vier mal bestimmt. Sie sind in Tabelle 6.2 gegenübergestellt.

Parameter	Messung 1 24.02.2010	Messung 2 02.03.2010	Messung 3 12.04.2010	Messung 4 28.04.2010	Mittel $\bar{x}$	Std.abw. $s_{x_i}$	rel. Gen. $r_s$
$f[\text{mm}]$	5,89	5,90	5,90	5,88	5,89	0,012	0,21 %
$x'_H[\text{mm}]$	2,81	2,82	2,81	2,80	2,81	0,006	0,19 %
$y'_H[\text{mm}]$	2,09	2,10	2,10	2,09	2,09	0,005	0,23 %
$d_1$	-0,0049	-0,0037	-0,0046	-0,0037	-0,0042	0,0006	15,24 %
$d_2$	0,0005	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004	0,0001	12,30 %

Tabelle 6.2: Ergebnisse aus Mehrbildkalibrierung C905

Auch im Fall der Mehrbildkalibrierung sind die Schwankungen der Werte für die Kamerakonstante wie auch den Bildhauptpunkt deutlich kleiner als 1 %. Die Verzeichnungsparameter weisen ebenfalls größere Schwankungen auf (ca. 15 %). Diese sind jedoch kleiner als die Schwankungen beim Einzelbildverfahren. Auffallend ist, dass die Verzeichnungsparameter  $d_1$  bzw.  $d_2$  zwischen den beiden Kalibrierverfahren stark differieren.

Der Vorteil der Einzelbildkalibrierung liegt darin, dass bereits aus einem Bild ohne Näherungswerte die innere und äußere Orientierung abgeleitet werden kann. Nachteilig ist allerdings, dass ein räumliches Testfeld vorliegen muss. Die Verzeichnungsparameter können nur unsicher bestimmt werden, da sie ausschließlich aus den Residuen der aus dem Modell abgeleiteten und der gemessenen Bildkoordinaten bestimmt werden. Wie bereits in Abbildung 5.4 gezeigt wurde, nimmt die Verzerrung zu den Bildrändern hin zu. Daher müsste das Kalibrierobjekt möglichst Format füllend aufgenommen werden, wenn ein realistischer Wert für die Verzeichnungsparameter ermittelt werden soll.

Da bei der Mehrbildkalibrierung mehrere Aufnahmen von unterschiedlichen Kamerastandpunkten getätigt werden, genügt hier ein planares Testfeld (Abbildung 6.2). Es müssen Näherungswerte eingeführt werden, die eine gewisse Kenntnis über die Kamera voraussetzen. Auch hier werden die Verzeichnungsparameter aus den Residuen und damit nur unsicher bestimmt. Allerdings kann durch die Mehrbildaufnahme das Kalibrierfeld unterschiedliche Bereiche in den Einzelbildern abdecken, so dass die Verzeichnungsparameter für den gesamten Bildbereich besser bestimmt werden können als beim Einzelbildkalibrierverfahren.

Beide Verfahren liefern vergleichbare Ergebnisse bei der Bestimmung der Parameter  $f$ ,  $x'_H$  und  $y'_H$ . Wegen des geringeren Einrichtungsaufwandes und der signifikant kleineren Schwankungen der Werte für die Verzeichnungsparameter wurde für die Stabilitätsprüfung der Kamera des C905 das Mehrbildkalibrierverfahren eingesetzt.

### 6.3 Stabilitätsüberprüfung der inneren Orientierung

Zunächst wird die Eignung einer Handykamera als Messinstrument für die geplante Anwendung untersucht. Die beiden Ursachen für eine Änderung der inneren Orientierung sind zum einen zeitlich bedingte Driften und zum anderen Änderungen aufgrund von Temperaturschwankungen.

Gewöhnlich werden Smartphones in Handtaschen oder in der Hosentasche (direkt am Körper) transportiert. Für die Nutzung als OIPS wird der Anwender das Smartphone beim Betreten des Gebäudes in die Hand nehmen, Aufnahmen tätigen und die Handykamera evtl. über einen längeren Zeitraum nutzen. Daher ändert sich die Temperatur des Smartphones, sowohl durch Temperaturänderungen in der unmittelbaren Umgebung als auch durch die eigene Erwärmung aufgrund längerer aktiver Nutzung des Smartphones.

Um die Stabilität der inneren Orientierung der Kamera in Bezug auf die genannten Einflüsse zu prüfen, wurde die Handykamera C905 in einem Zeitraum von 58 Tagen 31 mal bei unterschiedlichen Temperaturen der äußeren Umgebung kalibriert (Abbildung 6.4). Außerdem wurden die Kalibrierungen teilweise nach längerer Inbetriebnahme des Smartphones (z. B. zur Nutzung des Internets oder als Kamera) durchgeführt. Der zeitliche Abstand zwischen den einzelnen Kalibrierungen wurde unterschiedlich gewählt (siehe Zeitskala in Abbildung 6.3).

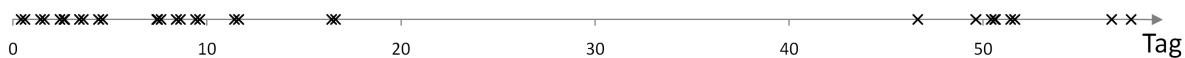


Abbildung 6.3: Zeitskala mit eingetragenen Kalibrierzeitpunkten (schwarze Kreuze)

Die Kalibrierung an sich fand immer im selben Raum unter ähnlichen Bedingungen statt, so dass eine Änderung der Parameter aufgrund unterschiedlicher Messbedingungen ausgeschlossen werden kann. Die Bestimmung der inneren Orientierung sowie Verzeichnung erfolgte mit einem photogrammetrischen Auswerteprogramm, welches das Mehrbildkalibrierverfahren (Luhmann, 2010a) verwendet. In Abbildung 6.4 ist die relative Änderung der intrinsischen sowie der Verzeichnungsparameter, die bei den Kalibriermessungen berechnet wurden, dargestellt.

Die Mittelwerte aller 31 Kalibrierungen werden als Nullwerte angenommen und relativ dazu die Beträge der Änderungen der Parameterwerte aus den einzelnen Kalibrierungen bestimmt. Wie in Abbildung 6.4 deutlich zu sehen ist, unterliegen die Verzeichnungsparameter wesentlich größeren relativen Schwankungen als die übrigen Parameter der inneren Orientierung. Die Werte für die Brennweite  $f$  und den Bildhauptpunkt  $H = (x'_H, y'_H)$  ändern sich maximal um 2,5%. Die relativen Änderungen der Verzeichnungsparameter erreichen dagegen bis zu 30%.

Die äußeren Temperaturänderungen, welche am Ende der Messperiode auftreten, haben keinen Einfluss auf  $f$  und  $H$ . Die Verzeichnungsparameter unterliegen in diesem Bereich zwar großen Schwankungen, doch ein systematischer Zusammenhang zwischen den Temperaturänderungen und den Werten von  $d_1$  und  $d_2$  ist aus Abbildung 6.4 nicht erkennbar.

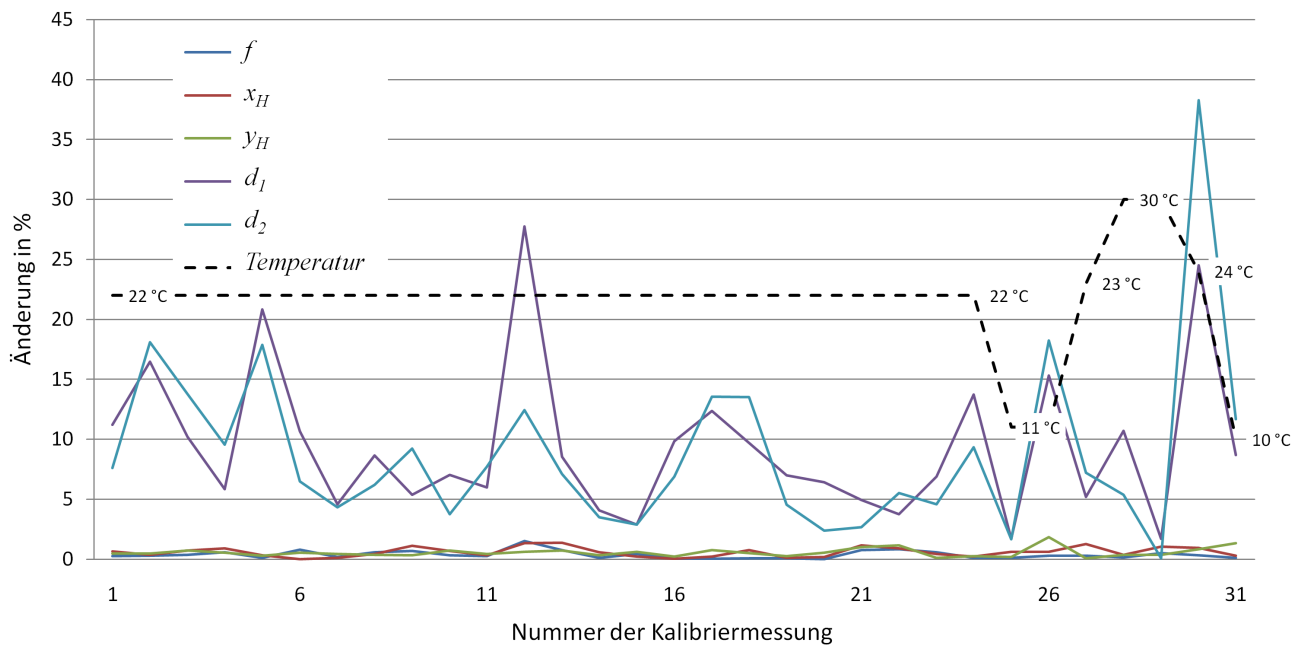


Abbildung 6.4: Relative Änderungen der intrinsischen Parameter und Verzeichnungsparameter

Eine zeitabhängige Drift ist aus Abbildung 6.4 ebenfalls nicht zu erkennen. Die Parameter der inneren Orientierung schwanken über den gesamten Messzeitraum nur geringfügig um ihren Mittelwert und auch bei den Verzeichnungsparametern ist keine systematische Veränderung der Werte festzustellen.

Parameter	Wert		Std.abw.	
$f$	5,89 mm	3398 px	$3,6 \mu\text{m}$	2 px
$x'_H$	2,81 mm	1622 px	$1,5 \mu\text{m}$	1 px
$y'_H$	2,10 mm	1211 px	$1,2 \mu\text{m}$	1 px
$d_1$	−0,0041		0,0001	
$d_2$	0,0004		0,000007	

Tabelle 6.3: Kalibrierdaten der intrinsischen Parameter

Der Einfluss der Schwankungen der inneren Orientierung, die in Tabelle 6.3 aufgeführt sind, auf die Positionsgenauigkeit wurden in Abschnitt 5.1 abgeschätzt. In dem simulierten Testfeld ergibt die aus 100 Wiederholungsmessungen in einem Punkt prozessierte mittlere Punktabweichung  $d_P$  über das gesamte Testfeld einen maximalen Wert von  $d_P = 0,05 \text{ cm}$ . Somit zeigen die Kalibrierergebnisse, dass die Kamera eine ausreichende Stabilität für das OIPS aufweist.





## 7 Klassifikation und Detektion von Türen

Für das beschriebene OIPS müssen neben der in Kapitel 6 untersuchten inneren Orientierung der Kamera die Koordinaten der Eckpunkte der Tür im Bild- und Objektkoordinatensystem vorliegen. Sowohl die Zuordnung der Türen im Objektsystem (Klassifikation) als auch die Detektion der Türeckpunkte im Bild soll automatisiert mit Hilfe gängiger Bildverarbeitungsmethoden erfolgen. Dafür werden zwei unterschiedliche Klassifikationsmethoden sowie Extraktionsverfahren zur Bestimmung der Bildkoordinaten der Türecken implementiert und untersucht. Die Untersuchungen beschränken sich auf Grauwertbilder, da sie im Gegensatz zu Farbbildern weniger Speicherplatz benötigen. Wegen des begrenzten Speicherplatzes auf einem Smartphone sowie der schnelleren Datenübertragung werden in dieser Arbeit ausschließlich Grauwertbilder ausgewertet.

### 7.1 Grundlagen der Bildverarbeitung

Zum besseren Verständnis der Prozesskette der Türklassifikation und Türeckpunktdetektion werden im Folgenden zunächst grundlegende Verfahren der Bildverarbeitung erläutert. Allerdings wird ausschließlich auf die Methoden eingegangen, welche bei den Untersuchungen für die Anwendung zur Türeckpunktdetektion eingesetzt werden.

#### 7.1.1 Bildpräsentation

Ein Bild kann als stufenlose Funktion  $I(x, y)$  mit  $I \in [0; \infty[$  beschrieben werden, wobei  $I$  die Bestrahlungsstärke in Lux ist (Abbildung 7.1-a). Die untere Intervallgrenze '0' entspricht der Farbe 'schwarz', die obere Intervallgrenze ' $\infty$ ' entspricht 'weiß'.

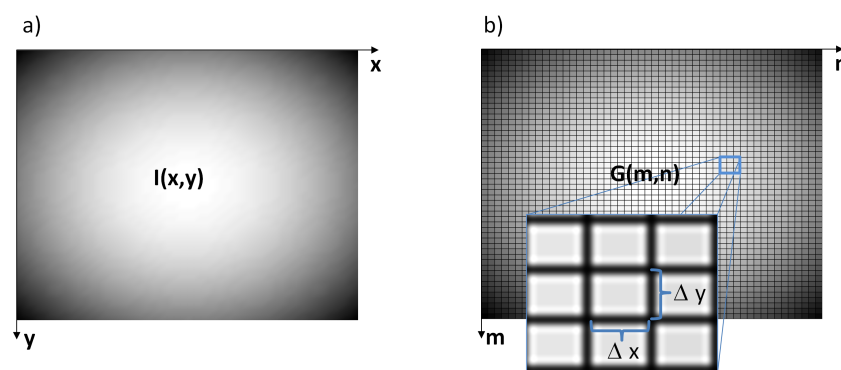


Abbildung 7.1: Repräsentation eines Bildes als stufenlose (a) und diskrete Funktion (b)

Für ein digitales Grauwertbild ist der Wertebereich von  $(x, y)$  durch die Sensorfläche der Digitalkamera vorgegeben. Durch die beschränkte Auflösung kann das Bild nur als diskrete Funktion  $G(m, n)$  dargestellt werden. Dazu wird die Sensorfläche in ein Raster unterteilt. Ein Rasterelement auf dem Gitter nennt man ein Pixel mit einer rechteckigen Pixelfläche von  $\Delta x \times \Delta y$ . Die Größe eines Pixel ist abhängig von der Auflösung des Sensors (Abbildung 7.1-b). Die untersuchten Bilder haben eine Auflösung von 8 Mpx, angeordnet in  $2448 \text{ px} \times 3246 \text{ px}$  mit einer Pixelfläche von  $0,0017 \text{ mm} \times 0,0017 \text{ mm}$ . Jedem Pixel kann je nach Bestrahlungsstärke ein ganzzahliger Wert aus einem festgelegten Wertebereich für  $G(m, n)$  vorgegeben werden. Für Grauwertbilder liegt dieser Wertebereich gewöhnlich bei  $G \in [0; 255]$ , wobei '0' der Farbe 'schwarz' und '255' der Farbe 'weiß' entspricht.

Jedes Grauwertbild kann als Histogramm dargestellt werden (vgl. Abbildung 7.2-a). Auf der Abszisse ist der Grauwert  $G(m, n)$  mit  $G \in [0; 255]$ , auf der Ordinate die Häufigkeit der Grauwerte dargestellt.

Um den Kontrast und dadurch die Trefferquote bei der Kantenfindung zu erhöhen, wird an den Bildern zunächst ein *Histogrammausgleich* durchgeführt. Das Ziel des globalen Histogrammausgleiches ist es, ein Ausgabebild zu generieren, dessen Histogramm möglichst gleichverteilt ist (Burger & Burge, 2006).

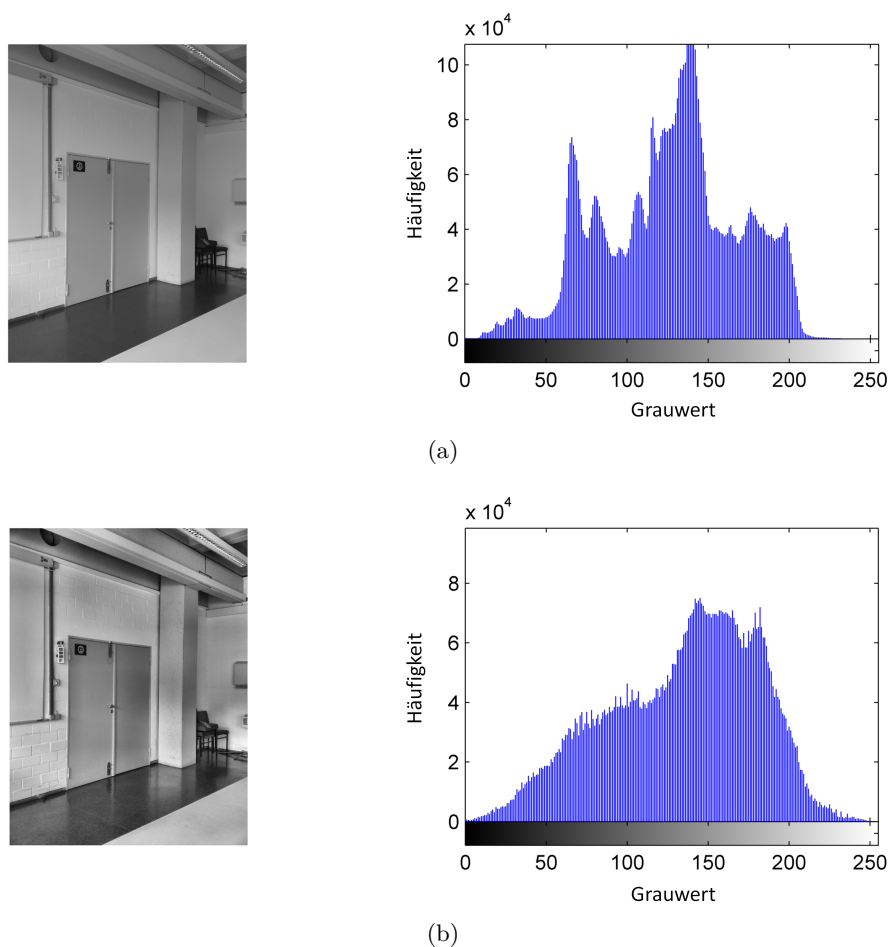


Abbildung 7.2: Gegenüberstellung Originalbild - Lokaler adaptiver Histogrammausgleich

Dadurch wird zum einen der Kontrast für stark vertretene Grauwertbereiche im Bild erhöht und zum anderen eine Helligkeitsnormierung vorgenommen. Unterschiedliche Bilder können so auf eine vergleichbare Intensitätsverteilung abgebildet werden. Diese individuelle Anpassung schafft eine gemeinsame Ausgangsbasis, auf der sich die einzelnen Bilder mit universellen Methoden weiterverarbeiten lassen. Zur Vorverarbeitung wurde ein lokaler, adaptiver Histogrammausgleich mit der in der *Image Processing Toolbox* von *Matlab* implementierten Funktion `adapthisteq()` angewendet (vgl. Abbildung 7.2-b). Dieser modifizierte Ansatz des globalen Histogrammausgleichs erhellt dunkle Grauwertbereiche, während hellere Grautöne meist unverändert bleiben.

### 7.1.2 Nachbarschaftsoperationen

Der globale Histogrammausgleich gehört zu den Punktoperationen in einem Bild, da jeder Grauwert eines Pixels im Ergebnisbildes  $G'(m, n)$  nur abhängig ist von demselben Pixel des Ausgangsbildes  $G(m, n)$ . Nachbarschaftsoperationen dagegen verändern den Wert eines Pixel in Abhängigkeit seiner Nachbarpixel. Sie liefern die Grundlage zur Analyse von Bildern sowie für Muster- und Objekterkennungsaufgaben.

Eine für diese Arbeit wichtige Eigenschaft von Nachbarschaftsoperatoren ist die Detektion einfacher Strukturen, wie Kanten, Ecken, Linien und homogener Bereiche. Ein Nachbarschaftsoperator  $N$  verknüpft durch eine geeignete Operation die Werte einer Nachbarschaft um einen Bildpunkt  $G(m, n)$  und schreibt das Ergebnis  $G'(m, n)$  wieder zurück an diesen Punkt. Diese Operation wird auf alle Bildpunkte angewandt. Ein Gebiet  $\mathbb{M}$  wird als Maske oder Fenster bezeichnet. Die Größe und Form von  $\mathbb{M}$  bestimmen die Eingangswerte aus  $G$  zur Berechnung von  $G'$ :

$$G'_{m,n} = N(G_{m-m',n-n'}, \forall [m', n']^T \in \mathbb{M}) \quad (7.1)$$

Ein Verfahren für Nachbarschaftsoperationen ist die *lineare Faltung*. Sie ist nach Jähne (2005) folgendermaßen definiert:

1. Die Filtermaske  $\mathbb{M}$  wird über dem Ausgangsbild  $G$  so positioniert, dass ihr Zentrum und Koordinatenursprung  $\mathbb{M}(0, 0)$  auf das aktuelle Bildelement  $G(m, n)$  fällt (siehe Abbildung 7.3).
2. Alle Bildpunkte werden mit dem jeweils darüberliegenden Filterkoeffizienten multipliziert und die Ergebnisse addiert.
3. Die resultierende Summe wird an der entsprechenden Position im Ergebnisbild  $G'(m, n)$  gespeichert.

An den Rändern eines Bildes überlappt die Filtermaske das Bild und kann nicht komplett bis zum Rand eingesetzt werden. Dadurch verkleinert sich das Ergebnisbild  $G'$  um  $\frac{\mathbb{M}}{2}$ . Um trotzdem ein Ergebnisbild mit unveränderter Größe zu erhalten, müssen dem Ausgangsbild an den Rändern, je nach Breite der Filtermaske, noch zusätzliche Pixel hinzugefügt werden. Die Randpixel können dabei entweder mit Nullen gefüllt werden, die Grauwerte des Ausgangsbildes auf den neuen Rand extrapoliert oder der ursprüngliche Rand gespiegelt werden. Bei der Randerweiterung entstehen Fehler, unabhängig davon, welches Prinzip

angewendet wird. Daher müssen zu detektierende Objekte mindestens um die halbe Breite der Filtermaske innerhalb des Bildes liegen.

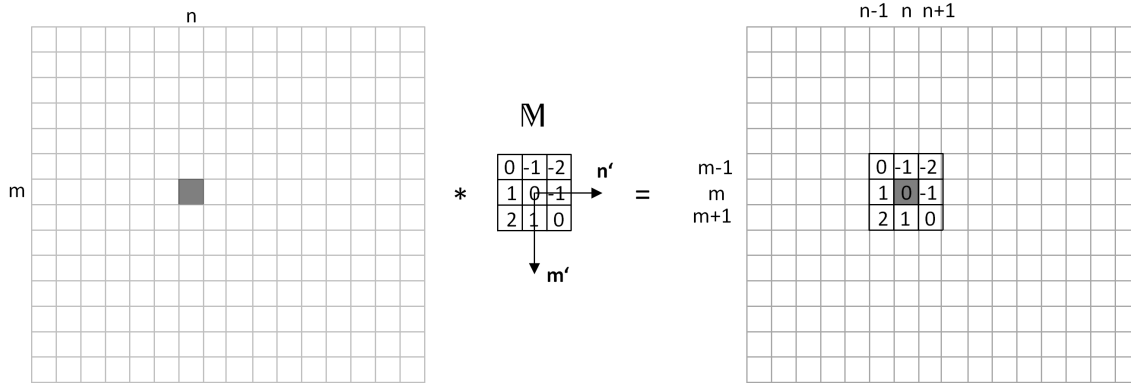


Abbildung 7.3: Diskrete Faltung mit einer  $3 \times 3$ -Filtermaske

### 7.1.3 Kantendetektion

Kanten in einem Bild sind signifikante Änderungen der Grauwerte quer zur Kantenrichtung in einem sehr kleinen Bildausschnitt. Die Änderung der Bestrahlungsstärke kann mathematisch anhand der ersten Ableitung von  $I(x, y)$  formuliert werden. Da es sich bei Bildern um zweidimensionale Funktionen handelt, gibt es zwei Komponenten von Koordinatenachsen  $x$  und  $y$ , deren Ableitungen in einem Gradientenvektor  $\nabla I(x, y)$  zusammengefasst sind:

$$\nabla I(x, y) = \begin{bmatrix} \frac{\delta I}{\delta x}(x, y) \\ \frac{\delta I}{\delta y}(x, y) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_x \\ I_y \end{bmatrix}. \quad (7.2)$$

Die richtungsunabhängige Information wird durch den Betrag des Gradienten

$$|\nabla I| = \sqrt{I_x^2 + I_y^2} \quad (7.3)$$

beschrieben. Dieser ist invariant bezüglich Bilddrehungen und daher unabhängig von der Orientierung der Bildstrukturen. Anhand des Richtungswertes der Funktion

$$\Theta = \arctan \left( \frac{I_x}{I_y} \right) \quad (7.4)$$

können horizontale ( $\Theta = 0^\circ$ ) und vertikale ( $\Theta = 90^\circ$ ) Kanten ermittelt werden.

Bei digitalen Aufnahmen kann keine allgemein gültige Ableitungsregel (analog 9.2) formuliert werden, da die Intensitätsinformationen als diskrete Funktionswerte  $G(m, n)$  vorliegen. Stattdessen werden die Nachbarwerte des zu untersuchenden Bildpunktes herangezogen und anhand einer Näherungsformel der Gradientenvektor  $\nabla G = [G_m \ G_n]^T$  berechnet.

Der lokale Gradient von  $I$  bzw.  $G$  ist die Grundlage der meisten Operatoren für die Kantendetektion. Sie unterscheiden sich praktisch nur von der Art und Weise, wie sie zum Endergebnis führen.

**Operatoren 1. Ordnung:** Klassische Operatoren nutzen die ersten Ableitungen der Bildfunktion zur Kantendetektion. Der *Sobel-Operator* (Luhmann, 2010b) beispielsweise approximiert die erste Ableitung in  $x$ - und in  $y$ -Richtung durch eine getrennte Faltung des digitalen Ausgangsbildes  $G(m, n)$  mit den Filtermasken (7.5).  $H_m^S$  ist die Filtermaske zum Hervorheben vertikaler Kanten. Mit  $H_n^S$  werden horizontale Kanten detektiert.

$$H_m^S = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 2 & 0 & -2 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix}, \quad H_n^S = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix}. \quad (7.5)$$

Aus den Filterergebnissen werden für jeden Bildpunkt Betrag und Richtung des Gradienten  $\nabla G$  berechnet und anschließend mittels Schwellwertuntersuchung darüber entschieden, ob es sich um ein Kantenpixel handelt oder nicht. Je besser die Ableitungsfiler 1. Ordnung auf eine Kante reagieren, desto stärker ist ihre „Richtungsabhängigkeit“ (anisotropes Verhalten). Um möglichst viele Richtungen abzudecken, müssten mehrere Filter, die in verschiedenen Richtungen wirken, eingesetzt werden. Allerdings erhöht sich durch sogenannte *Kompass-Operatoren* (Burger & Burge, 2006) der Rechenaufwand, so dass solche Verfahren für eine schnelle Detektion von Türrahmen nicht geeignet sind.

**Operatoren 2. Ordnung:** Operatoren, die auf der 2. Ableitung basieren, können dagegen a priori als isotrope Kantendetektoren eingesetzt werden. Die zweiten Ableitungen lassen sich in einem Vektor  $\nabla^2 I(x, y)$  zusammenfassen:

$$\nabla^2 I(x, y) = \begin{bmatrix} \frac{\delta^2 I}{\delta^2 x}(x, y) \\ \frac{\delta^2 I}{\delta^2 y}(x, y) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{x,x} \\ I_{y,y} \end{bmatrix}. \quad (7.6)$$

Mit den aus (7.6) resultierenden Filtermasken in  $x$ - und  $y$ -Richtung erhält man nach Luhmann (2010b) für den diskreten Fall den *Laplace-Operator*  $D_L$  (7.7):

$$D_L = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -2 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & -2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & -4 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}. \quad (7.7)$$

Da  $D_L$  rotationsinvariant ist, lassen sich Kanten in allen Richtungen detektieren. Das mit  $D_L$  gefaltete Bild  $G'$  wird auf Nullstellen untersucht. Eine Nullstelle ist dann gegeben, wenn die zugehörigen Nachbapixel unterschiedliche Vorzeichen aufweisen. Die Bildpunkte mit einem ausreichend großen Gradientenbetrag  $|\nabla G|$  (festgesetzt über Schwellwert) werden dann als Kantenpunkte markiert. Ein Nachteil des Laplace-Operators ist seine Rauschempfindlichkeit. Bereits kleine Grauwertänderungen werden als

Kanten interpretiert (Luhmann, 2010b). Um dieser negativen Eigenschaft entgegen zu wirken, wird vor der Faltung mit  $D_L$  zunächst eine Bildglättung durchgeführt. Ein geeigneter Filter für eine Bildglättung ist z. B. der *Laplacian-of-Gaussian*-Filter, auch *Marr-Hildreth*-Operator genannt (Luhmann, 2010b).

**Canny-Edge Detector:** Mit den bisher beschriebenen Methoden kann eine gute Rauschreduzierung nur auf Kosten einer guten Lokalisierbarkeit erhalten werden und umgekehrt. Mit dem Ansatz nach *Canny* wird in dieser Beziehung der bislang bestmögliche Kompromiss zwischen diesen beiden konträren Forderungen geschaffen (Efford, 2000). Im Canny-Algorithmus werden mehrere Arbeitsschritte durchlaufen (siehe Abbildung 7.4).

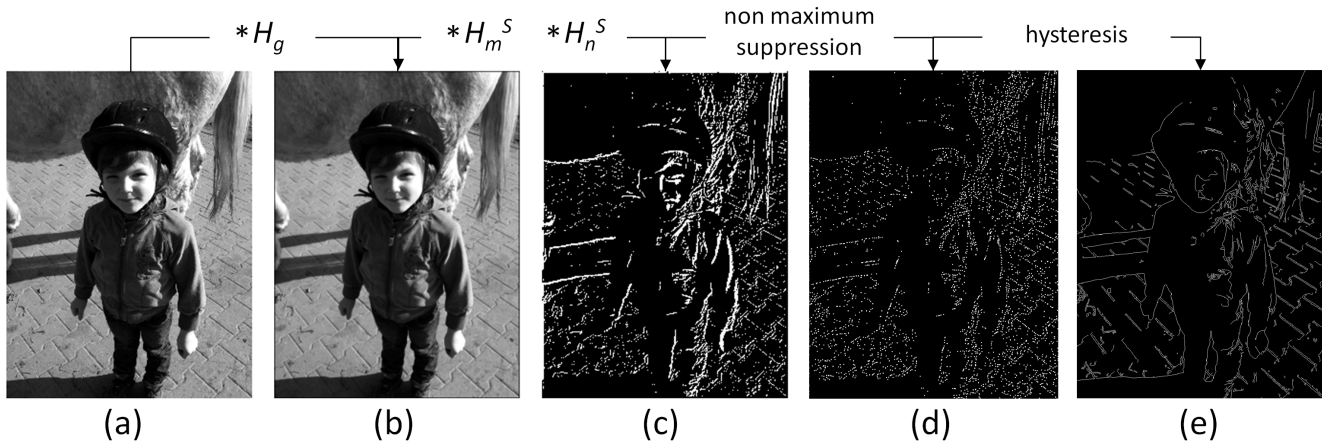


Abbildung 7.4: Ablauf Canny Algorithmus

Zunächst wird das Bild mit einem Gauß-Filter  $H_g$  geglättet (Abbildung 7.4-b). Der Gauß-Filter entspricht einem gewichtetem Mittelwertfilter. Die Gewichtung erfolgt mit nachfolgendem Gewichtsansatz

$$g_{\sigma}(m', n') = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \cdot e^{-\frac{m'^2 + n'^2}{2\sigma^2}}, \quad (7.8)$$

wobei der Scheitel der Gauß'schen Glockenkurve im Zentrum der Filtermatrix liegt (Kraus, 1996). Die Standardabweichung  $\sigma$  in (7.8) bestimmt dabei den Grad der Rauschunterdrückung. Ein großes  $\sigma$  führt zu großer Rauschunterdrückung, allerdings werden dadurch auch schwache Kanten unterdrückt.

Mit einem Kantenfilteroperator (z. B. Sobel) wird ein kontrastreicheres Betragsbild berechnet (Abbildung 7.4-c). Anschließend werden in diesem Betragsbild nur lokale Maxima der Kantenstärke als potenzielle Kantenpixel zugelassen. Bei dieser sogenannten *Non-Maximum-Unterdrückung* werden für jedes Pixel seine beiden Nachbarn in Gradientenrichtung (senkrecht zur Kante) betrachtet. Ein lokales Maximum liegt vor, wenn die benachbarten Pixel einen niedrigeren Wert als der betrachtete Bildpunkt haben. Dadurch werden die Kanten ausgedünnt und können so lokalisiert werden (Abbildung 7.4-d).

Auf die vorverarbeiteten Pixel wird ein *Linienverfolgungsverfahren mit Hysterese* (Efford, 2000) angewendet. Dabei werden zwei Schwellwerte  $T_1$  und  $T_2$  vorgegeben, mit  $T_1 < T_2$ . Zunächst werden alle Pixel mit

Werten größer  $T_2$  als Kantenpixel markiert. Alle angrenzenden Punkte, deren Werte größer als  $T_1$  sind, werden ebenfalls als Kantenpixel gekennzeichnet. Dadurch werden schwache oder falsche Kanten, die oft durch Restrauschen entstehen, unterdrückt. Das Resultat ist ein binäres Kantenbild, in dem die Objektränder als Konturlinien dargestellt sind (Abbildung 7.4-e).

Ein Canny-Edge-Detektor wird somit mit drei Parametern konfiguriert, der Standardabweichung  $\sigma$  des Gauß-Filters sowie den Schwellwerten  $T_1$  und  $T_2$ .

### 7.1.4 Objekterkennung

Mit den Verfahren zur Kantendetektion werden zunächst nur binäre Kantenbilder erzeugt. Es liegt noch keine Information darüber vor, welche Punkte eine Kante repräsentieren. Es werden nur mögliche Kantenpunkte hervorgehoben, die nicht zwangsläufig zu einer echten Kante gehören. Daher müssen diese Kantenbilder mit anderen Methoden analysiert werden, welche auffällige Strukturen aufgrund ihrer Form finden.

**Morphologische Operationen:** *Morphologische* Filter können Strukturen in einem Bild gezielt beeinflussen. Dadurch lassen sich z. B. Kanten, die aufgrund eines zu geringen Kontrastes nicht vollständig mit einem Kantendetektor erkannt wurden zu einer geschlossenen Kante auffüllen. Gleichmaßen können aber auch einzelne verstreute Pixel, die aufgrund von Rauschen oder Unebenheiten in der Objektoberfläche nicht vom Kantendetektor aus dem Bild entfernt wurden, anhand morphologischer Operatoren eliminiert werden. Morphologische Operatoren werden primär in Binärbildern eingesetzt, d. h. für Bilder mit nur zwei verschiedenen Pixelwerten 0 und 1. Sie finden aber auch Anwendung in Grauwert- oder sogar Farbbildern (Burger & Burge, 2006). Die Bildmatrix  $G$  wird mit einer Filtermatrix  $H$ , die auch Strukturelement genannt wird, in Beziehung gesetzt. Je nach Anwendung des Operators, werden einem Objekt im Bild entweder Bildpunkte hinzugefügt oder von einem Objekt abgezogen (Abbildung 7.5).

Das Strukturelement  $H$  enthält wie das Ausgangsbild nur die Werte 0 und 1 und besitzt ebenfalls ein Koordinatensystem mit dem Mittelpunkt (hot spot) als Ursprung:

$$H(i, j) \in \{0, 1\}. \quad (7.9)$$

$H$  wird jedem Bildpunkt  $p(m, n) \in \{1\}$  von  $G$  überlagert und sein Zentrum anschließend auf das nächste  $p(m, n) \in 1$  verschoben. Die beiden elementaren Operatoren, die bei der Überlagerung von  $H$  mit  $G$  eingesetzt werden, heißen *Dilatation* und *Erosion*.

Die Dilatation ist die Menge aller Pixel, für die die Schnittmenge  $G$  und  $H$  nicht leer ist:

$$G \oplus H = \{p | H \cap G \neq \emptyset\}. \quad (7.10)$$

Gleichung (7.10) entspricht der logischen Oder-Operation, d. h. für jedes Pixel wird überprüft, ob  $H_p$  an mindestens einer Stelle mit dem Bild im Bereich der Überlappung übereinstimmt. Trifft dies zu,

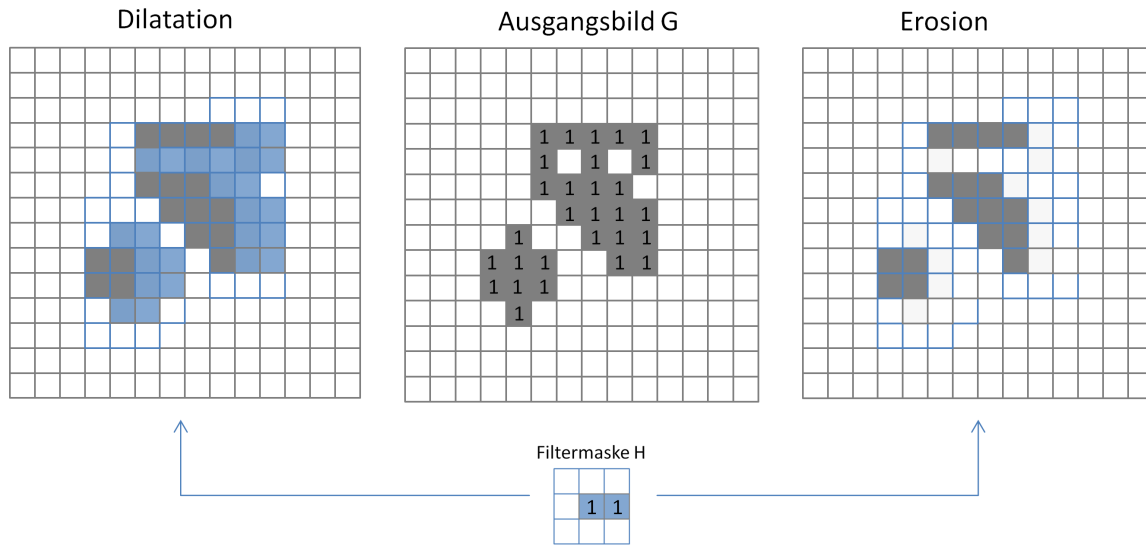


Abbildung 7.5: Morphologische Operationen Dilatation und Erosion (graue und blaue Felder entsprechen Bildpunkten  $p$ )

werden die Pixel aus  $H$  zu den vorhandenen Objekten im Binärbild hinzugefügt und die Objekte somit vergrößert (siehe Abbildung 7.5, Dilatation). Dadurch können eventuell vorhandene Objektlücken oder Risse geschlossen werden, allerdings auch nahe beieinanderliegende Objekte vereinigt werden, was die Objekterkennung verfälschen kann.

Die Erosion ist die Menge aller Pixel, für die  $H$  eine Teilmenge von  $G$  ist:

$$G \ominus H = \{p | H \subseteq G\} = \{p | H \cap G = H\}. \quad (7.11)$$

In Gleichung (7.11) wird überprüft, ob die Menge des Strukturelements an allen Stellen mit der Bildmenge übereinstimmt. Die Erosion bewirkt damit, dass die im Bild vorliegenden Objekte verkleinert werden. Sehr kleine Objekte können vollständig entfernt werden (siehe Abbildung 7.5, Erosion).

Durch Erosion und Dilatation lassen sich die Ränder von geschlossenen Objekten extrahieren, wodurch Formparameter wie Fläche oder Umfang abgeleitet werden können. Zur Veranschaulichung soll ein Binärbild gegeben sein, in dem sich weiße Objekte  $\mathcal{O}$  (Grauwerte 1) vor einem schwarzen Hintergrund (Grauwert 0) befinden (Abbildung 7.6-a). Die Randpixel der Objekte haben an mindestens einer Seite keine gleichartigen Nachbarn. Durch Anwendung von Erosion können die Randpunkte entfernt werden (Abbildung 7.6-b). Die dafür geeigneten Erosionsoperatoren sind in Gleichung (7.12) dargestellt.

$$H_4 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad \text{oder} \quad H_8 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}. \quad (7.12)$$



Durch Differenz des erodierten Bildes  $E$  mit dem Originalbild  $O$  erhält man ein Ergebnisbild  $R$ , welches die inneren Ränder der vorliegenden Objekte  $\mathcal{O}_O$  beinhaltet (siehe Abbildung 7.6-c). Für den Umfang  $U$  von  $\mathcal{O}_O$  bzw.  $\mathcal{O}_R$  gilt in diesem Fall:  $U(\mathcal{O}_O) = U(\mathcal{O}_R)$ .

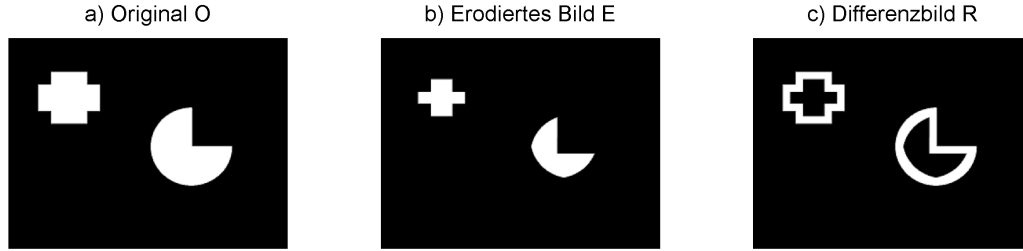


Abbildung 7.6: Randextraktion zweier Formen durch wiederholte Erosion und anschließender Subtraktion

Im Gegensatz dazu werden bei einer Dilatation und anschließender Subtraktion des Originals  $O$  vom dilatierten Bild  $D$  die äußeren Objektränder erzeugt (Abbildung 7.7-c). Für  $\mathcal{O}_O$  und  $\mathcal{O}_R$  gilt dann:  $U(\mathcal{O}_O) < U(\mathcal{O}_R)$ .

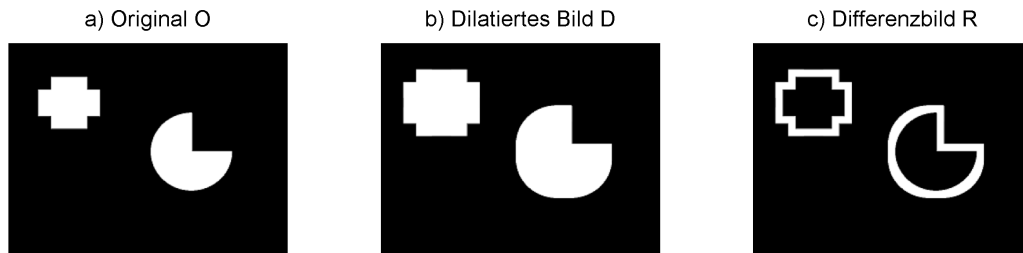


Abbildung 7.7: Randextraktion zweier Formen durch wiederholte Dilatation und anschließender Subtraktion

Die Nachteile der beiden Operationen Dilatation und Erosion können durch ihre Kombination teilweise kompensiert werden. So wird z. B. die erosionsbedingte Verkleinerung der Objekte durch eine anschließende Dilatation mit dem gleichen Strukturelement ausgeglichen. Die Kombination aus Erosion und Dilatation wird *Öffnen* (*Opening*) genannt:

$$G \circ H = (G \ominus H) \oplus H. \quad (7.13)$$

Das Öffnen bewirkt, dass vereinzelte Pixel (z. B. aus einer nicht perfekten Kantendetektion) ausgesiebt werden, ohne die Größe der im Bild vorliegenden Objekte zu verkleinern.

Die duale Operation zum Öffnen wird *Schließen* (*Closing*) genannt:

$$G \bullet H = (G \oplus H) \ominus H. \quad (7.14)$$

Hier wird die zunächst durch die Dilatation verursachte Vergrößerung der Objekte mittels nachfolgender Erosion behoben, so dass im Ergebnisbild alle Objekte wieder ihre ursprüngliche Größe haben.

Öffnen und Schließen sind idempotente Operationen, d. h. eine zweite Anwendung der gleichen Operation mit demselben Strukturelement bewirkt keine weitere Veränderung (Jähne, 2005).

**Formanalyse:** Für die Unterscheidung verschiedener Objekte bzw. Strukturen wird ihre Form analysiert. Um kreisförmige von anderen geschlossenen Objekten zu unterscheiden, analysiert man die Rundheit  $c(\mathcal{O}_c)$  aller Objekte  $\mathcal{O}_c$ . Die Rundheit ist eine dimensionslose Größe. Sie beschreibt das Verhältnis zwischen der Fläche  $A(\mathcal{O}_c)$  und dem Umfang  $U(\mathcal{O}_c)$  eines geschlossenen Objekts und kann definiert werden über

$$c(\mathcal{O}_c) = 4\pi \cdot \frac{A(\mathcal{O}_c)}{U(\mathcal{O}_c)^2} \leq t, \quad t \leq 1. \quad (7.15)$$

Wenn  $c(\mathcal{O}_c) = 1$  ist, dann handelt es sich um ein ideal kreisförmiges Objekt. Für alle anderen geometrischen Formen ist  $c(\mathcal{O}_c) < 1$ . Indem sowohl  $c$  als auch die Fläche  $A(\mathcal{O}_c)$  aller geschlossenen Objekte berechnet wird, können kreisförmige Objekte bestimmter Größe im Bild von anderen Objekten unterschieden werden.

**Quadtree-Zerlegung:** Die *Quadtree Zerlegung* (Ochotta, 2002) ist ein Verfahren zur Detektion homogener Flächen. Hierbei wird das Bild auf quadratische Maße skaliert und anschließend in vier gleich große Quadrate aufgeteilt. Innerhalb dieser Quadrate wird der größte mit dem kleinsten Grauwert verglichen und jedes Quadrat, falls die relative Differenz beider Werte einen Schwellwert  $t$  überschreitet, wiederum in vier gleich große Quadrate zerlegt. Die Zerlegung wird so lange wiederholt, bis die relative Grauwertdifferenz  $t$  unterschritten oder die kleinstmögliche Quadratgröße erreicht wird. Jedes Quadrat erhält eine Bezeichnung, anhand derer sich am Ende der Zerlegung alle jeweils zusammengehörenden Quadrate, welche eine homogene Fläche bilden, zusammenfassen lassen. Als zusätzliches Ergebnis erhält man daher u. a. eine unregelmäßig geformte Kurve als Begrenzung dieser Flächen.

**Houghtransformation:** Die *Houghtransformation* ist eine von Paul Hough entwickelte Methode zur Identifikation vorgegebener geometrischer Strukturen in einem Binärbild. Mit ihr können parametrisierbare Formen in Punktverteilungen wie z. B. Geraden, Kreise oder Ellipsen lokalisiert werden (Burger & Burge, 2006). Der Vorteil der Houghtransformation ist, dass Linien auch dann erkannt werden können, wenn sie durch Rauschen oder systematische Fehler gestört oder teilweise verdeckt sind.

Im Folgenden wird die Identifikation von Geraden anhand der Houghtransformation beschrieben. Das Kriterium für einen Kantenpunkt ist, dass er auf einer Geraden liegt und somit die allgemeine Geradengleichung in *Hesse'scher Normalform (HNF)*

$$r = m \cdot \cos(\theta) + n \cdot \sin(\theta) \quad (7.16)$$

erfüllt, wobei  $r$  der Abstand der Geraden zum Ursprung ist und  $\theta$  der Winkel zwischen dem Lot auf die Gerade durch den Ursprung des Bildkoordinatensystems und der Ordinate (siehe Abbildung 7.8-a). Durch jeden Punkt  $p(x, y)$  können  $\infty$  viele Geraden mit variierenden  $(r, \theta)$  gehen, z. B.  $(r_j, \theta_j)$  in Punkt  $p_2$ .

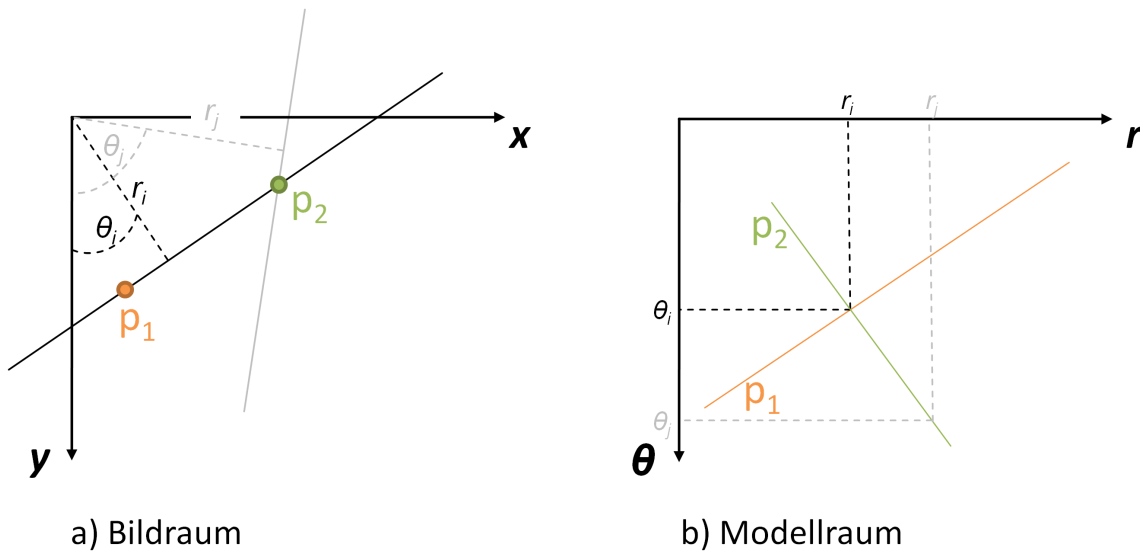


Abbildung 7.8: Geradendarstellung in Hesse'scher Normalenform

Abbildung 7.8-b zeigt die Darstellung von Punkten im **Modellraum**. Ein Punkt  $p(x, y)$  aus dem Ortsraum bzw. Bildraum wird im Modellraum als Gerade  $p(r, \theta)$  dargestellt. Mit der HNF kann also jedem Punkt im Ortsraum eine Gerade im Modellraum zugeordnet werden. Der Schnittpunkt der Geraden im Modellraum bestimmt ein eindeutiges Paar  $(r, \theta)$ , das wiederum im Bildraum einer eindeutigen Geraden entspricht.

Für den diskreten Fall muss der kontinuierliche **Modellraum** diskretisiert werden, d. h. es wird zunächst ein zweidimensionales, endliches  $k \times l$  Akkumulator-Array erzeugt (siehe Abbildung 7.9-b). Jeder Zellenwert im Akkumulatorarray wird mit dem Wert '0' initialisiert. Für jedes Paar  $(r_i, \theta_j)$ ,  $i \in [1; k]$ ,  $j \in [1; l]$  wird die Gerade im Ortsraum (Binärbild) ermittelt (Abbildung 7.9-a). Die Gerade wird auf Kantenpunkte (Grauwert=1) abgesucht. Für jeden Kantenpunkt auf der Geraden  $g(r, \theta)$  erhöht sich der Zellenwert an der Stelle  $(r, \theta)$  im **Modellraum** um 1.

Je mehr Punkte im Ortsraum auf einer Geraden liegen, desto höher wird der Zellenwert mit gemeinsamen  $\theta$  und  $r$  im Akkumulatorarray (Abbildung 7.9-b). Je feiner das Akkumulatorarray gerastert ist und je höher die Auflösung eines Bildes, umso besser kann die Houghtransformation Linien im Bild detektieren. Entsprechend rechenintensiver und länger dauert dann allerdings auch die Auswertung.

**Ausgleichsgerade:** Liegt bereits eine grob segmentierte Struktur vor, kann alternativ zur Houghtransformation unter Anwendung der MkQ eine Ausgleichsgerade in die Kantenlinie eingepasst werden. Mit der allgemeinen Geradengleichung

$$n = s \cdot m + t, \quad (7.17)$$

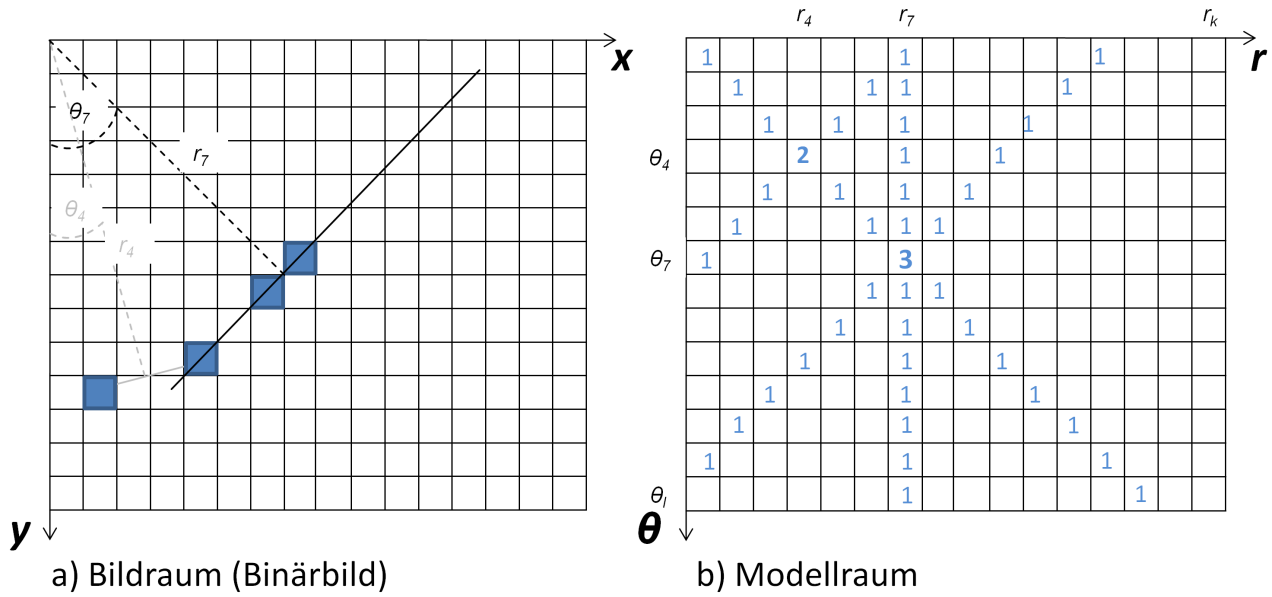


Abbildung 7.9: Geradendarstellung im Akkumulatorarray

mit  $s$  als Steigung der Geraden und  $t$  als Achsenabschnitt, kann das folgende überbestimmte lineare Gleichungssystem aufgestellt werden:

$$\overbrace{\begin{bmatrix} m_1 & 1 \\ \vdots & \vdots \\ m_i & 1 \end{bmatrix}}^A \cdot \overbrace{\begin{bmatrix} s \\ t \end{bmatrix}}^{\mathbf{x}} = \overbrace{\begin{bmatrix} n_1 \\ \vdots \\ n_i \end{bmatrix}}^{\mathbf{b}} \quad \text{bzw.} \quad A \cdot \mathbf{x} = \mathbf{b}. \quad (7.18)$$

Die Minimierung der Fehlerquadratsumme führt auf das Normalgleichungssystem:

$$\mathbf{x} = (A^T A)^{-1} \cdot (A^T \mathbf{b}). \quad (7.19)$$

Der Lösungsvektor  $\mathbf{x}$  beinhaltet die Steigung und den Achsenabschnitt der jeweiligen Ausgleichsgeraden.

## 7.2 Realisierte Verfahren zur Türeckpunktdetektion

Hinsichtlich der Detektion und Klassifikation der Eckpunkte von Türen im Bild wurden zwei unterschiedliche Ansätze mit den in Abschnitt 7.1 vorgestellten Methoden untersucht und bezüglich ihrer Robustheit verglichen (Willert et al., 2011). Beim ersten Verfahren wurde im Rahmen einer Diplomarbeit am Geodätischen Institut der TU Darmstadt ein Verfahren realisiert, welches spezielle an den Türen angebrachte Zielmarken detektiert und die Türen dadurch identifiziert (Etzel, 2010).

Alternativ dazu wurde innerhalb eines Projektseminars am Institut für Regelungstechnik und Robotik (rtr) an der TU Darmstadt eine Methode untersucht, welche anhand natürlicher Merkmale mindestens

einen Türkandidaten im Bild detektiert (Gering & Raß, 2010). Erst im Nachhinein wird die Tür identifiziert, indem sie mit Referenzbildern aus einer a priori angelegten Bilddatenbank, welche Bilder aller bekannten Türen enthält, verglichen wird.

Prinzipiell kann der Prozess, eine Tür in einem Bild zu finden, die Tür zu klassifizieren und die Koordinaten der Türeckpunkte zu bestimmen, in vier Schritte unterteilt werden: Generierung einer Referenzdatenbank, Detektion, Klassifikation und Extraktion der Bildkoordinaten.

### 7.2.1 Klassifikation über Zielmarken

**Generieren einer Zielmarken-Datenbank:** Zielmarken sind visuelle Marken, in denen Informationen zu den Objektkoordinaten der Eckpunkte der Tür, die mit der Zielmarke ausgestattet ist, codiert vorliegen. Für jede bekannte Tür muss daher eine Zielmarke mit einem eindeutigen Code generiert werden. Alle Markencodes sind in einer Datenbank abgespeichert.

**Detektion des Markers:** Um eine visuelle Marke zu detektieren, werden charakteristische Merkmale benötigt, die mit standardisierten Bildverarbeitungsmethoden (Abschnitt 7.1) in einem Bild gefunden werden können. In dem realisierten Verfahren wird die visuelle Marke mit einem Binärbild mit einem weißen Kreis auf schwarzem Hintergrund realisiert. Der Kreis schließt eine weiße Codierung ein (vgl. Abbildung 7.10-a). Um die Marke zu finden, werden alle geschlossenen Objekte  $\mathcal{O}_c$  anhand von morphologischen Operationen lokalisiert. Diese geschlossenen Objekte dienen als Kandidaten für die Marken. Die Fläche  $A(\mathcal{O}_c)$  und der Umfang  $U(\mathcal{O}_c)$  aller geschlossenen Formen können anhand ihrer Pixel bestimmt werden. Um die kreisförmigen Zielmarken von den übrigen geschlossenen Objekten zu unterscheiden, wird die Rundheit  $c(\mathcal{O}_c)$  aller Objekte  $\mathcal{O}_c$  analysiert. Die Zielmarken können im Bild auch eine elliptische Form annehmen, da die Türen nicht zwingend frontal aufgenommen werden. Für eine Ellipse gilt allerdings  $c < 1$ , da sie keinen idealen Kreis repräsentiert. Daher werden alle  $\mathcal{O}_c$ , für die gilt  $0.9 \leq c(\mathcal{O}_c) \leq 1$  als Zielmarkenkandidaten gespeichert. Ein weiteres Kriterium für ein Zielmarkenobjekt ist seine Fläche. Für die Zielmarken im Testfeld muss die Fläche  $A(\mathcal{O}_c)$  einen Wert von mindestens 200 px haben, um als visuelle Marke erkannt zu werden.

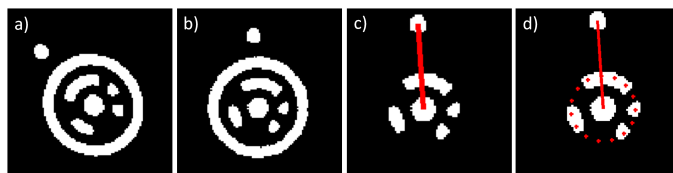


Abbildung 7.10: Transformieren und Dekodieren der Zielmarke.

**Klassifikation über Dekodierung des Markers:** Um die codierten Informationen zu extrahieren, muss die Zielmarke zuerst normalisiert werden. Die Normalisierung erfolgt über eine Affintransformation

$$T = R \cdot S = \begin{bmatrix} \cos(\omega) & -\sin(\omega) & 0 \\ \sin(\omega) & \cos(\omega) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{d}{b} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{d}{a} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (7.20)$$

Die Parameter der Transformationsmatrix werden über eine Ellipse bestimmt, die das Objekt  $\mathcal{O}_c$  umhüllt (vgl. Abbildung 7.11-a). Der Durchmesser  $d$  ist über einen Kreis bestimmt, welcher denselben Flächeninhalt wie die Ellipse hat (Abbildung 7.11-b). Der Winkel  $\omega$  zwischen der großen Hauptachse  $a$  der Ellipse und der Horizontalachse des Bildes definiert den Rotationswinkel der Transformation (Abbildung 7.11-c).

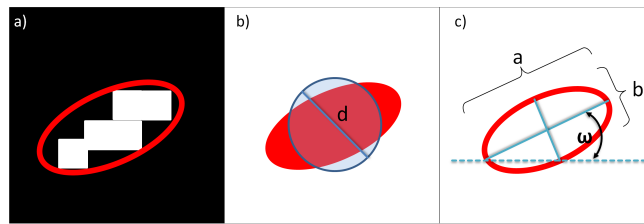
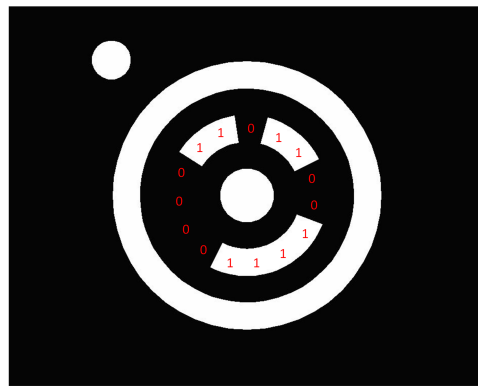


Abbildung 7.11: a) Umhüllende Ellipse, b) Kreisdurchmesser  $d$ , c) Rotationswinkel  $\omega$  und Hauptachsen der Ellipse  $a$  und  $b$ .

Nach der Normalisierung kann die Information der Zielmarke dekodiert werden (siehe Abbildung 7.10). Der Code existiert aus 15 Segmenten. Die Verbindungslinie zwischen Markenzentrum und dem Mittelpunkt des kleinen Kreises außerhalb des Codekreises in Abbildung 7.10-c definiert den Anfang des Markencodes. Der Radius der Marke ist definiert über die Schwarz-Weiß-Wechsel, welche die rote Linie in Abbildung 7.10-c/-d überstreicht. Ausgehend von dem Punkt, der auf der roten Linie mit Abstand  $r$  vom Markenzentrum liegt, wird alle 24 Grad eine Markierung gesetzt, die ein Codesegment definiert (siehe Abbildung 7.10-d). Anhand der Bitwerte jedes Segments (0 oder 1) kann die Tür eindeutig zugeordnet und mit der Datenbank synchronisiert werden, um die notwendigen Informationen der Tür zu erhalten. Die ersten beiden Segmente bestimmen die Türart (Einzel- oder Doppeltür), das dritte Segment identifiziert die Türseite (innen oder außen). Die folgenden 12 Segmente stehen für den Bit-Code, der die Türnummer repräsentiert. Ein Beispiel ist in Abbildung 7.12 gegeben.

**Extraktion der Bildkoordinaten der Referenzpunkte:** Durch Aneinanderreihung morphologischer Operationen (Kombinationen aus Öffnen und Schließen) werden die Konturen der Tür, die mit der Zielmarke ausgestattet ist, extrahiert. Als Ergebnis erhält man den approximierten Türumriss (vgl. Abbildung 7.13-a). Im Anschluss werden die zur Kontur nächstgelegenen Linien extrahiert (vgl. Abbildung 7.13-b). Die Schnittpunkte der extrahierten Linien (rote Kreuze) repräsentieren die Türecken. Ihre Position im Bild ist durch die zugeordneten Bildkoordinaten eindeutig festgelegt.



Türart: Doppeltür  
(Binärwerte: 11)

Türseite: Außen  
(Binärwert: 0)

Türnummer: 243  
(Binärwerte: 110011110000  
 $= 2^0 + 2^1 + 2^4 + 2^5 + 2^6 + 2^7$ )

Abbildung 7.12: Codierung der Außenseite einer Doppeltür mit der Nummer 243.

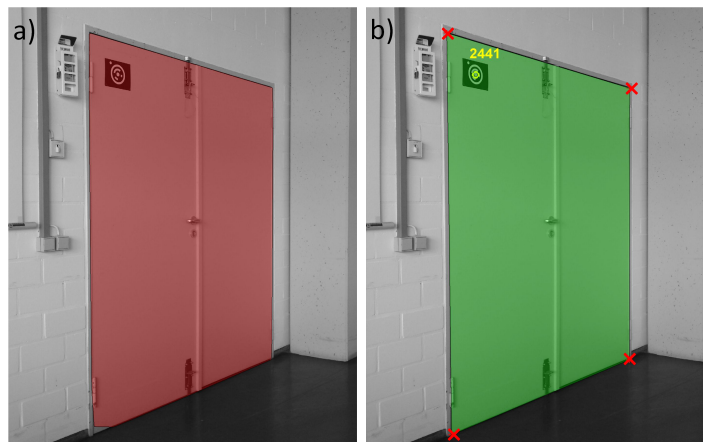


Abbildung 7.13: a) Kontur des Türobjekts, b) Ergebnis der Türdetektion.

### 7.2.2 Klassifikation über Referenzbilder

Liegen keine Zielmarken für die Detektion und Klassifikation der Türen vor, müssen stattdessen die Referenzbilder der bekannten Türen genutzt werden. Abhängig vom Aufnahmestandort relativ zur Tür variiert das Erscheinungsbild des Türobjektes im jeweils aufgenommenen Bild beträchtlich, sowohl bezüglich der Größe als auch der Form. Abbildung 7.14 zeigt die Variabilität einer Tür, die von verschiedenen Standpunkten aus aufgenommen wurde. Neben dem Problem der starken Variabilität stellt sich außerdem die Frage, was die eindeutigen Merkmale einer bestimmten Tür sind, die sie von allen anderen Türen unterscheidet.

**Generieren einer Bild-Datenbank:** Bevor eine Positionierung erfolgen kann, müssen zunächst Bilder von allen Türen in der Umgebung gemacht werden. Diese Referenzbilder (vgl. Abbildung 7.15), werden dann in einer Datenbank zusammen mit den Bild- und Objektkoordinaten der Türeckpunkte abgespeichert. Dabei sollte darauf geachtet werden, dass annähernd normalisierte Referenzbilder erzeugt werden, in denen die Türen das Bild fast vollständig ausfüllen und die wenig verzerrt sind. Außerdem können mehr als eine Aufnahme aus unterschiedlichen Perspektiven nützlich sein, um die eindeutige Zuordnung einer



Abbildung 7.14: Unterschiedliche Ansichten derselben Tür.

aktuell aufgenommenen Tür zu gewährleisten.



Abbildung 7.15: Referenzbilder für die Datenbank (in den roten Umrandungen befinden sich jeweils Bilder der selben Tür, aus verschiedenen Perspektiven fotografiert).

**Detektion einer Tür:** Der Detektionsprozess ist eine Kombination aus den Kontur- und Oberflächenmerkmalen, die eine Tür am besten charakterisieren. Mit diesen Merkmalen werden gute Türkandidaten für die Klassifikation erkannt. Die Konturmerkmale einer Tür sind Linien im Bild, die anhand des Canny-Edge-Algorithmus sowie einer Houghtransformation extrahiert werden (Abbildung 7.16).

Die grünen Linien mit gelben Anfangs- und Endpunkten stellen die extrahierten Konturmerkmale dar. Die Oberflächenmerkmale der Tür sind Regionen mit homogenen Grauwerten, die durch Quadtree-Zerlegung extrahiert werden. Abbildung 7.17-a zeigt die resultierenden Oberflächen einer solchen Quadtree-Zerlegung (weiße Kontur).

Die Form einer Tür ist viereckig. Daher werden die Konturen der identifizierten Oberflächen durch Anwendung des *Douglas-Peucker-Algorithmus* (Douglas & Peucker, 1973) auf viereckige Konturen  $C_Q$  reduziert. Von den aus der Houghtransformation detektierten Geraden werden diejenigen herausgesucht,



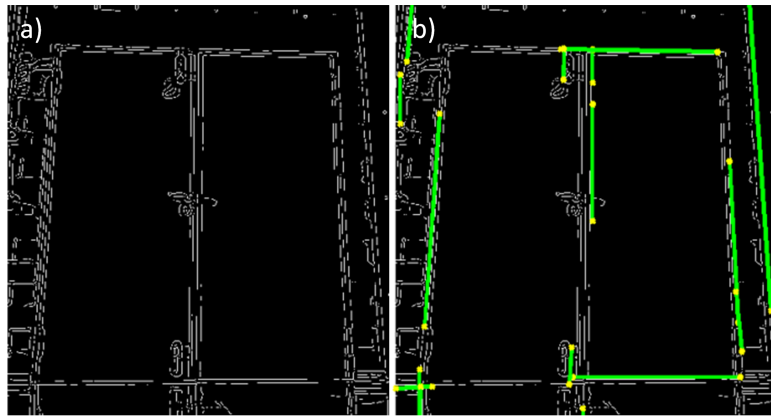


Abbildung 7.16: Konturmerkmale, extrahiert a) mit Canny-Edge-Algorithmus und b) mittels Houghtransformation.

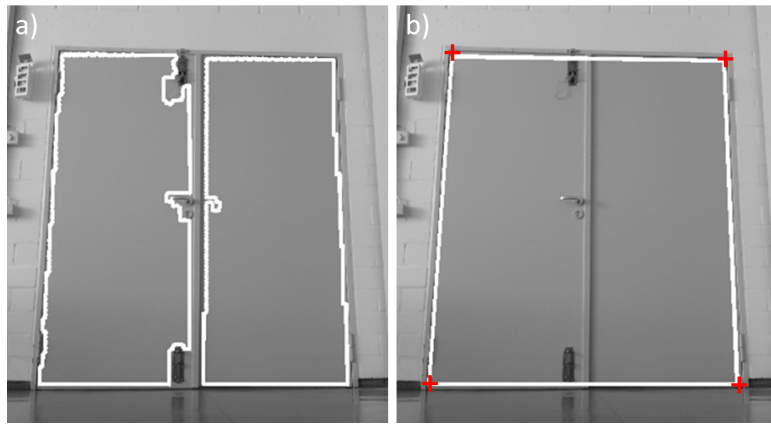


Abbildung 7.17: a) Kontur aus Quadtree-Segmentierung, b) Ergebnis aus Vierecksdetektion.

die in unmittelbarer Nähe zu den Kanten der  $\mathcal{C}_Q$  liegen. Durch die Schnittpunkte der Hough-Linien ergeben sich ebenfalls mehrere mögliche Vierecke  $\mathcal{C}_H$ . Nun werden die Flächen  $A_Q(\mathcal{C}_Q)$  mit den Flächen  $A_H(\mathcal{C}_H)$  verglichen, indem die quadrierte Differenz

$$\mathcal{C}_H^* = \underset{\mathcal{C}_H}{\operatorname{argmin}} (A_Q(\mathcal{C}_Q) - A_H(\mathcal{C}_H))^2 \quad (7.21)$$

der Oberflächen unter Beachtung von  $\mathcal{C}_H$  minimiert wird. Alle Flächen, für die  $\mathcal{C}_H^* \leq t$ ,  $t = 0.1$  ist, stellen mögliche Türkandidaten dar.

Im Falle einer Doppeltür werden die beiden Türflügel separat segmentiert (siehe Abbildung 7.17-a). Um die beiden Türhälften zu einer Tür zusammenzuführen, werden die segmentierten Flächen dahingehend untersucht, ob je zwei benachbarte Punkte aus zwei Vierecken in unmittelbarer Nähe zueinander liegen. In diesem Fall werden die beiden Vierecke zu einem zusammengefügt (Abbildung 7.17-b).

Die Überprüfung der Türkandidaten auf weitere Kriterien, wie Geometrie oder Grauwert einer Tür, schränken die Anzahl möglicher Kandidaten noch weiter ein.

**Klassifikation der Tür:** Zunächst wird das Bild aller detektierten Vierecke (Türkandidaten) transformiert und auf ein Detailbild reduziert, welches nur die normalisierte Tür zeigt. Dabei bedeutet der Begriff normalisierte Tür, dass benachbarte Türkanten einen Winkel von  $90^\circ$  einschließen und alle Türkanten gleich lang sind (siehe Abbildung 7.18). Dann können für jedes Viereck die unterschiedlichen *Regions Of Interest* (ROIs) definiert werden (vgl. rote Rechtecke in Abbildung 7.18), in denen bestimmte Türmerkmale, wie z. B. ein Türgriff erwartet werden.

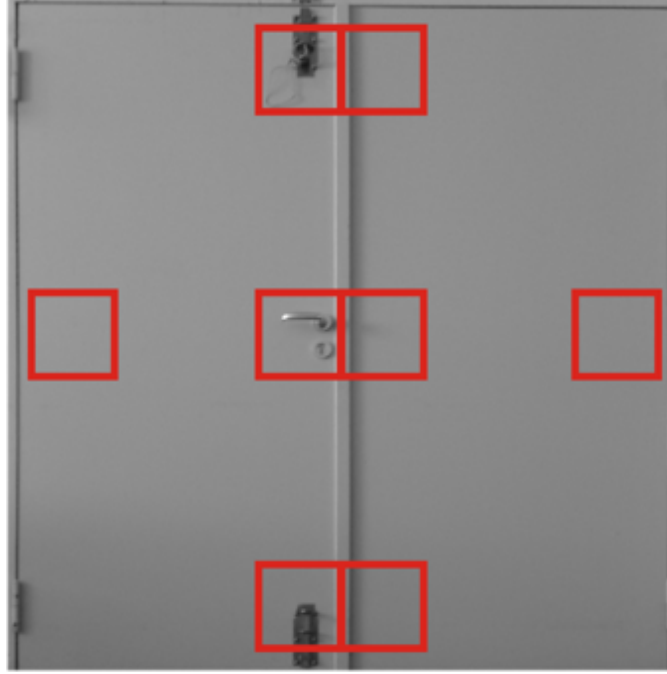


Abbildung 7.18: Normalisiertes Bild mit ROIs.

Dieser Vorgang führt zu einer Vorklassifikation in drei Unterklassen von Türtypen, nämlich Türen mit zwei Türflügeln, mit oder ohne Türriegel und einfache Türen. Danach werden die vorklassifizierten Türkandidaten mit allen Referenzbildern der Datenbank verglichen, die zur selben Unterklasse gehören. Zum Vergleich wird jedes komplette Referenzbild  $\mathbf{I}_R$  perspektivisch so verzerrt ( $\mathcal{W}(\mathbf{I}_R)$ ), dass die Konturen der Tür innerhalb des Referenzbildes genau mit dem viereckigen Türkandidaten des verzerrten Originalbildes  $\mathbf{I}_C$  zusammenfallen. Dazu wird ein Referenzbild simuliert, das von derselben Position aufgenommen zu sein scheint wie das Bild, welches klassifiziert werden soll. Um zu untersuchen, welches Referenzbild am besten zum Originalbild passt, wird die folgende Fehlergleichung

$$\mathbf{I}_R^* = \operatorname{argmin}_{\mathbf{I}_R} \sqrt{(1 - \rho_{R,C})^2 + \left\| \frac{\mathbf{m}_C - \mathbf{m}_R}{\mathbf{m}_R} \right\|^2}, \quad (7.22)$$

bezüglich des Referenzbildes  $\mathbf{I}_R$  minimiert, wobei  $\rho_{R,C}$  der Korrelationskoeffizient (Luhmann (2010b)) zwischen  $\mathbf{I}_C$  und  $\mathcal{W}(\mathbf{I}_R)$  ist und die Vektoren  $\mathbf{m}_C$  und  $\mathbf{m}_R$  die Hu-Momente (Hu (1962)) von  $\mathbf{I}_C$  und  $\mathcal{W}(\mathbf{I}_R)$  beinhalten. Das resultierende Referenzbild  $\mathbf{I}_R^*$  liefert schließlich die Türeckpunkte im Objektkoordinatensystem. Eine detaillierte Erläuterung der Gleichung (7.22) für den Vergleich von Original- und Referenzbild ist in Gering & Raß (2010) gegeben.

**Extrahieren der Bildkoordinaten der Referenzpunkte:** Die Bildkoordinaten der Eckpunkte werden bei diesem Verfahren bereits während des Detektionsprozesses extrahiert und sind durch die Schnittpunkte der Houghlinien gegeben, die am nächsten zur Quadtree-Kontur liegen. Die roten Kreuze in Abbildung 7.17-b zeigen das Ergebnis solcher Schnittpunkte.

## 7.3 Qualitätsanalyse der Türdetektion und -klassifikation

Sowohl die Zielmarken- als auch die Referenzbildmethode werden bezüglich ihrer Robustheit und Genauigkeit analysiert (Diefenbach, 2011). Die Robustheit der beiden beschriebenen Verfahren ist hier definiert über die Zuverlässigkeit, mit der eine Tür im Bild erkannt und korrekt klassifiziert wird. Die Detektion und Klassifikation wird für beide Verfahren separat getestet und die Ergebnisse miteinander verglichen.

Die Genauigkeit ist darüber definiert, wie genau die Koordinaten der Türecken im Bild extrahiert werden können. Die Bestimmung der Bildkoordinaten erfolgt in beiden Verfahren mit denselben Bildverarbeitungsalgorithmen (Canny Edge bzw. Houghtransformation).

### 7.3.1 Robustheit

Zum Testen der Robustheit wird für beide Verfahren derselbe Datensatz mit insgesamt 100 Bildern verwendet (Beispiele, siehe Abbildung 7.19). Fünf Bilder aus dem Datensatz enthalten keine Tür, 22 Bilder enthalten Türen, die jedoch teilweise verdeckt sind. Für die Zielmarkenmethode werden Zielmarken mit den in Abbildung 7.20 angegebenen Maßen an den Türen angebracht.



Abbildung 7.19: Beispiele aus dem Bilddatensatz; obere Reihe: störungsfreie Bilder, untere Reihe: Bilder ohne Türen oder mit Störungen

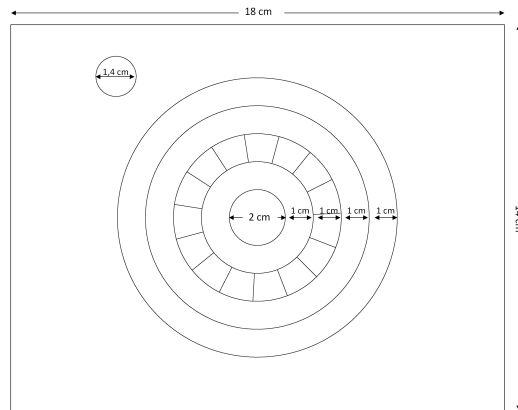


Abbildung 7.20: Muster der verwendeten Zielmarke

Es werden zwei Tests (Test A und Test B) unabhängig voneinander als *Zwei-Klassen-Problem* (Kroschel et al., 2011) definiert. In der statistischen Testtheorie (Niemeier, 2002) entspricht das *Zwei-Klassen-Problem* dem Aufstellen von Nullhypothese  $H_0$  und Alternativhypothese  $H_A$ :

$H_0$ : Es ist eine Tür im Bild enthalten.

$H_A$ : Es ist keine Tür im Bild enthalten.

Die Kriterien, nach denen jede Methode bewertet wird, sind in Tabelle 7.1 und 7.2 dargestellt. In Test A wird geprüft, wie zuverlässig eine Tür im Bild detektiert wird. In Test B wird getestet, wie zuverlässig ein Türkandidat im Bild detektiert **und** dieser dem richtigen Referenzobjekt der Datenbank zugeordnet wird. Die Confusion-Matrizen in den Tabellen 7.3-7.6 zeigen die Ergebnisse der beiden Tests.

Testwert	Kriterien	
richtig positiv $r_p$	Tür in Bild enthalten und richtig als Türkandidat detektiert	$H_0$ richtigerweise annehmen
falsch positiv $f_p$	Türkandidat detektiert obwohl keine Tür vorhanden	$H_A$ fälschlicherweise verwerfen
falsch negativ $f_n$	Tür in Bild enthalten aber kein Türkandidat detektiert	$H_0$ fälschlicherweise verwerfen
richtig negativ $r_n$	Keine Tür vorhanden und kein Türkandidat erkannt	$H_A$ richtigerweise annehmen

Tabelle 7.1: Test A: Definition des Zwei-Klassen-Problems für Detektion

Testwert	Kriterien	
richtig positiv $r_p$	Tür in Bild enthalten und als richtige erkannt	$H_0$ richtigerweise annehmen
falsch positiv $f_p$	Tür erkannt obwohl nicht vorhanden	$H_A$ fälschlicherweise verwerfen
falsch negativ $f_n$	Tür in Bild enthalten aber nicht oder als falsche erkannt	$H_0$ fälschlicherweise verwerfen
richtig negativ $r_n$	Keine Tür vorhanden und dies richtig erkannt	$H_A$ richtigerweise annehmen

Tabelle 7.2: Test B: Definition des Zwei-Klassen-Problems für Klassifikation

**Test A:** Bei der Detektion über Zielmarken wird ein Türkandidat zu 77% richtig detektiert. Umgekehrt wird  $H_0$  in 22 von 95 Fällen fälschlicherweise verworfen. Das entspricht einem *Fehler 1. Art* (Niemeier, 2002) von 23%. Bilder ohne Tür bzw. Zielmarke werden in allen 5 Fällen richtig als negativ ausgewertet (Tabelle 7.3).  $H_A$  wird demnach in 0 von 5 Fällen fälschlicherweise verworfen, d. h. der *Fehler 2. Art* (Niemeier, 2002) beträgt 0%.

Mit der Referenzbildmethode können 71% richtig detektiert werden (Fehler 1. Art = 29%), allerdings werden hier in 3 von 5 Fällen Türkandidaten detektiert, obwohl keine Tür im Bild vorhanden ist, d. h. der Fehler 2. Art beträgt hier 60% (Tabelle 7.4). Der hohe Anteil falsch detektierter Türkandidaten im Falle der Referenzbildmethode liegt an der Ähnlichkeit der Türgeometrie zu anderen Objekten. So wird z. B. ein Bilderrahmen als Türkandidat erkannt. Die Zielmarkenmethode liefert hier ein robustes Ergebnis, da das Erscheinungsbild der Zielmarken sich wesentlich von der üblichen Umgebung unterscheidet.

	positiv angenommen	negativ angenommen
<b>positiv</b>	73 richtig positiv	22 falsch negativ
<b>negativ</b>	0 falsch positiv	5 richtig negativ

Tabelle 7.3: Test A: Confusion-Matrix für Detektion über Zielmarken

	positiv angenommen	negativ angenommen
<b>positiv</b>	68 richtig positiv	27 falsch negativ
<b>negativ</b>	3 falsch positiv	2 richtig negativ

Tabelle 7.4: Test A: Confusion-Matrix für Detektion über Referenzbilder

**Test B:** Bei der Klassifikation mit Zielmarken werden die Zielmarken in 68% der Fälle erkannt und richtig decodiert (Tabelle 7.5). Der Fehler 1. Art beträgt demnach 32%. Bilder ohne Tür bzw. Zielmarke werden in allen 5 Fällen richtig als negativ ausgewertet (Fehler 2. Art = 0%). Gründe für die relativ hohe  $f_n$ -Rate sind z. B. zu große Abstände zur Tür. Reale Testmessungen (Diefenbach, 2011) haben ergeben, dass die Zielmarke in einem Abstand bis zu 9 m richtig klassifiziert werden kann, allerdings nur, wenn die Umgebung ausreichend beleuchtet ist und die Marke möglichst unverzerrt aufgenommen wurde.

Bei der Klassifikation über Referenzbilder werden nur 56% der Bilder richtig klassifiziert (Fehler 1. Art = 44%). Die übrigen können entweder nicht klassifiziert werden oder werden falschen Türen zugeordnet. Ein Grund für die hohe Anzahl falscher Zuordnungen ist, dass sich die Türen in der Testumgebung in den meisten Fällen in Farbton bzw. Grauwert und Form sehr ähnlich sind (vgl. Abbildung 7.15). In 2 von 5 Fällen werden Bilder ohne Tür auch als solche erkannt (Fehler 2. Art = 60%). Die Ergebnisse sind in Tabelle 7.6 dargestellt.

	positiv angenommen	negativ angenommen
positiv	65 richtig positiv	30 falsch negativ
negativ	0 falsch positiv	5 richtig negativ

Tabelle 7.5: Test B: Confusion-Matrix für Klassifikation über Zielmarken

	positiv angenommen	negativ angenommen
positiv	53 richtig positiv	42 falsch negativ
negativ	3 falsch positiv	2 richtig negativ

Tabelle 7.6: Test B: Confusion-Matrix für Klassifikation über Referenzbilder

Zum Vergleich der Robustheit der beiden Verfahren werden die Ergebnisse der Confusion-Matrizen in einer *Receiver Operating Characteristics* (ROC)-Graphik (Fawcett, 2005) gegenüber gestellt (Abbildung 7.21).

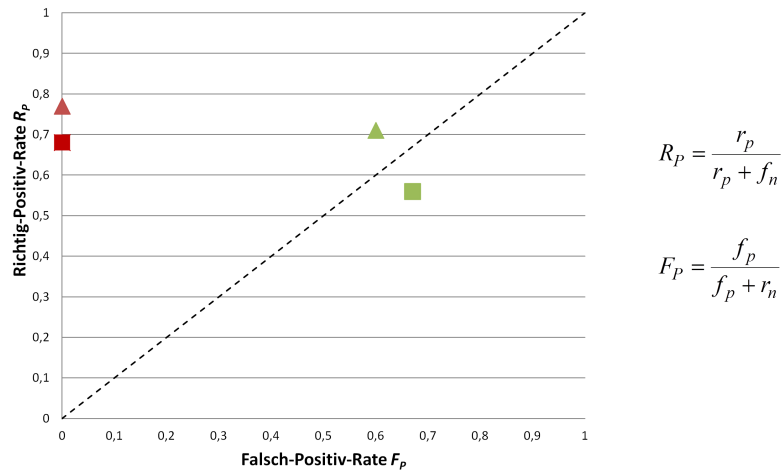


Abbildung 7.21: Treffer- und Fehlerquote aus Test A (Dreiecksymbol) und Test B (Quadratsymbol): Ziemarkenmethode = rot, Referenzbildmethode = grün.

Der ROC-Graph stellt die Richtig-Positiv-Rate (Trefferquote) der Falsch-Positiv-Rate (Fehlerquote) gegenüber. Diese beiden Indikatoren werden aus den Confusion-Matrizen berechnet. Die Formeln sind in Abbildung 7.21 enthalten.

Die Indikatoren der Detektion und Klassifikation mittels Zielmarken liegen direkt auf der y-Achse, d. h. alle Bilder ohne Tür werden auch als solche eingestuft. Gleichzeitig ist der Anteil richtig detektierter und klassifizierter Türen (77% bzw. 68%) relativ hoch. Für die Referenzbildmethode weist der Detektionsprozess eine relativ hohe Falsch-Positiv-Rate auf. Für die Klassifikation liegt der Indikator aufgrund der sinkenden Trefferquote sogar unterhalb der Winkelhalbierenden des Diagramms und zeigt damit ein eher schlechtes Ergebnis bezüglich der Robustheit. Nur 56% der Bilder mit Türen werden richtig detektiert **und** klassifiziert, während Bilder ohne Türen in 67% der Fälle falsch klassifiziert werden (siehe Abbildung 7.21).

#### 7.3.2 Genauigkeit

Für die Bestimmung der äußeren Genauigkeit der detektierten Bildkoordinaten der Türeckpunkte werden deren Koordinaten in allen Bildern aus dem Testdatensatz manuell abgegriffen und als Sollwerte angenommen. Dabei werden alle 65 Bilder verwendet, die bei der Klassifikation über Zielmarken auf  $r_P$  getestet worden sind, da die Bestimmung der Türeckpunkte im Bild nur durchgeführt werden kann, wenn die Tür vorher korrekt klassifiziert worden ist. Die Ergebnisse sind in Tabelle 7.7 dargestellt.

Die mittleren Abweichung liegen bei 10 bzw. 13 px. Abweichungen in dieser Größenordnung führen nach den theoretischen Abschätzungen auf eine Punktabweichung  $d_P \leq 50$  cm. Im besten Fall sind die

	Breite [px]	Höhe [px]
mittlere Abweichung $d_{x_m} / d_{y_m}$	13	10
Standardabw. $s_{x_m} / s_{y_m}$	7	7
minimale Abweichung $d_{x_{min}} / d_{y_{min}}$	0	0
maximale Abweichung $d_{x_{max}} / d_{y_{max}}$	85	111

Tabelle 7.7: Detektionsgenauigkeit bei allen richtig positiv getesteten Bildern

automatisch detektierten Bildkoordinaten mit den Sollkoordinaten identisch. Die maximalen Abweichungen betragen  $d_{x_{max}} = 85$  px und  $d_{y_{max}} = 111$  px. Die extremen Ausreißer sind auf die Fehleranfälligkeit der Detektionsalgorithmen gegenüber ungünstigen Lichtverhältnissen zurückzuführen. So können z. B. Schatten dazu führen, dass die falsche Kante detektiert wird (Abbildung 7.22-a). Ebenso ist die Detektion anfällig gegenüber Störobjekten, z. B. Personen (Abbildung 7.22-b).

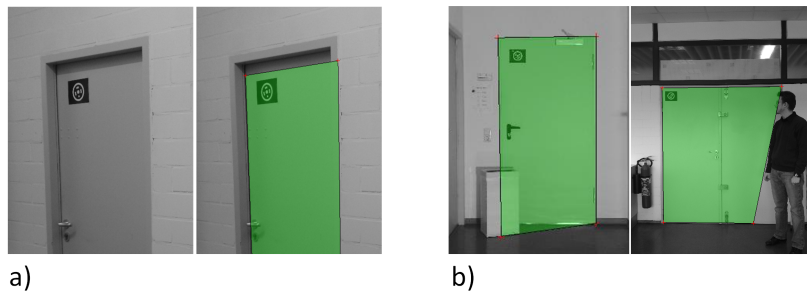


Abbildung 7.22: Fehlerhafte Kantendetektion

### 7.3.3 Einschränkungen

Sowohl die Klassifikation als auch die Detektion von Türen ist nur begrenzt möglich. Voraussetzung ist in jedem Fall, dass die Türen geschlossen sind und nicht durch störende Objekte verdeckt werden. Weitere Einschränkungen ergeben sich bei Schrägaufnahmen, größeren Entfernungen zwischen Kamera und Tür oder ungünstiger Beleuchtung.

**Aufnahmekonfiguration:** Bei den Tests können Aufnahmen, die von einem Halbkreis (Radius 4 m, Mittelpunkt im Schwerpunkt der Tür) aufgenommen werden, in einem Sektor von  $50^\circ$  bis  $150^\circ$  (roter Bereich in Abbildung 7.23) korrekt ausgewertet werden. Der Rundheitsparameter nimmt in diesen Fällen einen Wert von 0,9065 an und liegt damit im Bereich eines Coderingkandidaten ( $0.9 \leq c(\mathcal{O}_c) \leq 1$ ).

**Entfernung:** Der Nummerncode kann in einem Abstand von bis zu 9 m (blauer Bereich in Abbildung 7.23) noch richtig decodiert werden. Die Größe der Zielmarke im Bild beträgt in diesem Fall  $67 \times 53$  px, die



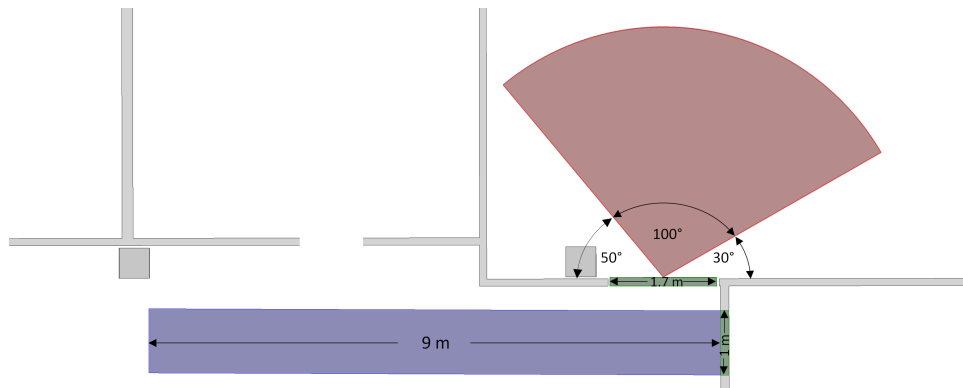


Abbildung 7.23: Aufnahmebereiche in der Testumgebung (rot: Bereich für Schrägaufnahmen, blau: Bereich für die Entfernung, grün: codierte Türen)

Fläche des Coderings  $A(\mathcal{O}_c)$  beträgt 706 px (die Fläche für einen Coderingkandidaten muss größer 200 px sein). Die Referenzbildmethode kann in diesem Fall keine Ergebnisse liefern, da hier in der Datenbank nur Referenzbilder gespeichert sind, bei denen die Türen in einem Abstand  $\leq 6$  m aufgenommen worden sind.

**Beleuchtung:** Die Identifizierung der Tür in den Testfeldern (Abbildung 7.23) findet zunächst bei Standardbeleuchtung, d. h. bei eingeschalteten Leuchtstoffröhren statt. Um zu testen, ob die Bilder auch bei ungünstigeren Lichtverhältnissen ausgewertet werden können, werden nochmals Untersuchungen bei absoluter Dunkelheit durchgeführt. In diesem Fall wird das kamerainterne Blitzlicht eingeschaltet. Als Standpunkte werden im Testfeld Kontrollpunkte im Abstand von 4 m und 7 m von der Tür gewählt (Tabelle 7.8).

Standpkt.	Identifizierung	
	Standard	Dunkelheit (mit Blitz)
4 m	✓	✓
7 m	✓	-

Tabelle 7.8: Korrekte Identifizierung der Türen bei unterschiedlicher Beleuchtung

Eine Identifizierung der Tür ist bei guter Konfiguration (4 m Abstand) sogar in absoluter Dunkelheit möglich (Abbildung 7.24-a). Bei großen Entfernungen  $\geq 7$  m kann jedoch das kamerainterne Blitzlicht die Szene nicht mehr komplett ausleuchten (Abbildung 7.24-b). Somit kann die Marke dann nicht mehr decodiert werden.

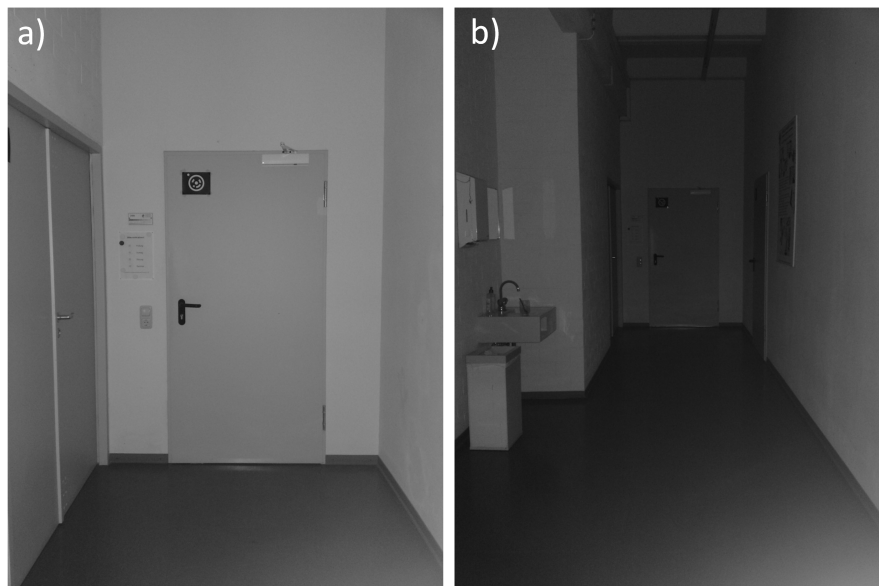


Abbildung 7.24: Aufnahmen bei Dunkelheit: a) 4 m-Abstand zur Tür, b) 7 m-Abstand zur Tür

#### 7.3.4 Bewertung

Für beide beschriebenen Klassifikationsmethoden wird eine Referenzdatenbank benötigt, in der die Objektkoordinaten der Türecken gespeichert sind. Bei der Klassifikation über Zielmarken besteht der Mehraufwand darin, dass zusätzliche Zielmarken zur Georeferenzierung an den Türen angebracht werden müssen, welche die Infrastruktur verändern. Dafür kann anhand dieser eindeutigen Merkmale eine robustere Klassifikation garantiert werden. Für die Referenzbildmethode müssen im Vorfeld Referenzbilder der Türen erfasst und die Türeckpunkte in diesen Bildern extrahiert werden. Dieser Datenbestand wird zusätzlich in einer Datenbank gespeichert. Der Einrichtungsaufwand ist somit ähnlich dem der Zielmarkenmethode. Die Umgebung wird hier allerdings nicht verändert.

Die Ergebnisse der Robustheitsanalyse zeigen, dass mit der Referenzbildmethode gerade bei ähnlichen Türen (wie sie in Bürogebäuden häufig vorkommen) eine fehlerfreie Klassifikation nicht garantiert werden kann.

Auch im zeitlichen Vergleich unterliegt die Referenzbildmethode der Zielmarkenmethode. Für Erstgenannte dauert der Auswerteprozess etwa 50 sec, für die Zweitgenannte durchschnittlich nur 20 sec. Hierzu ist allerdings anzumerken, dass die Auswertedauer durch eine effizientere Umsetzung in einer schnellen Programmiersprache (z. B. C++) noch reduziert werden kann.

Das Detektionsverfahren könnte noch durch ein nachgeschaltetes Abprüfen von Kriterien bzgl. der Türgeometrie verbessert werden. Beim aktuellen Stand kann eine genaue Detektion der Bildkoordinaten jedoch noch nicht vollautomatisiert, sondern nur durch Interaktion mit dem Nutzer garantiert werden. Um grobe Fehldetektionen der Bildkoordinaten auszuschließen, könnten diesem die detektierten Kanten zunächst angezeigt werden, um seine Entscheidung herbeizuführen, ob eine Positionierung durchgeführt oder das Bild verworfen werden soll.

Die Ergebnisse dieses Kapitels zeigen deutlich, dass eine robuste und effektive Lösung zur Klassifikation einer Tür nur durch die Zielmarkenmethode gegeben ist. Die Markierungen bedeuten zwar eine Veränderung der Umgebung, sollten jedoch von Passanten aufgrund ihrer geringen Größe nicht als störend empfunden werden.



## 8 Technische Umsetzung des OIPS

In Kapitel 3.1 wurde bereits die Hardware aufgeführt, mit der das in Kapitel 3.2 vorgestellte Konzept für ein OIPS realisiert werden soll. Die Detektion und Klassifikation der Türeckpunkte im Bild wird dabei durch die Zielmarkenmethode realisiert. Im Folgenden werden sowohl die Verteilung der einzelnen Komponenten des OIPS als auch deren Funktionen und Zusammenhänge erläutert.

### 8.1 Verteilung

Das Cybershot Handy C905 von Sony Ericsson dient als Client für das OIPS. Als Server wird ein PC von Transtec eingesetzt, auf dem sowohl Java als auch Matlab zur Auswertung der Kameraposition genutzt werden. Die Spezifikationen der beiden Komponenten wurden bereits in Abbildung 3.4 aufgeführt. Eine Übersicht über die einzelnen Systemkomponenten und ihre Verknüpfungen ist in Abbildung 8.1 gegeben.

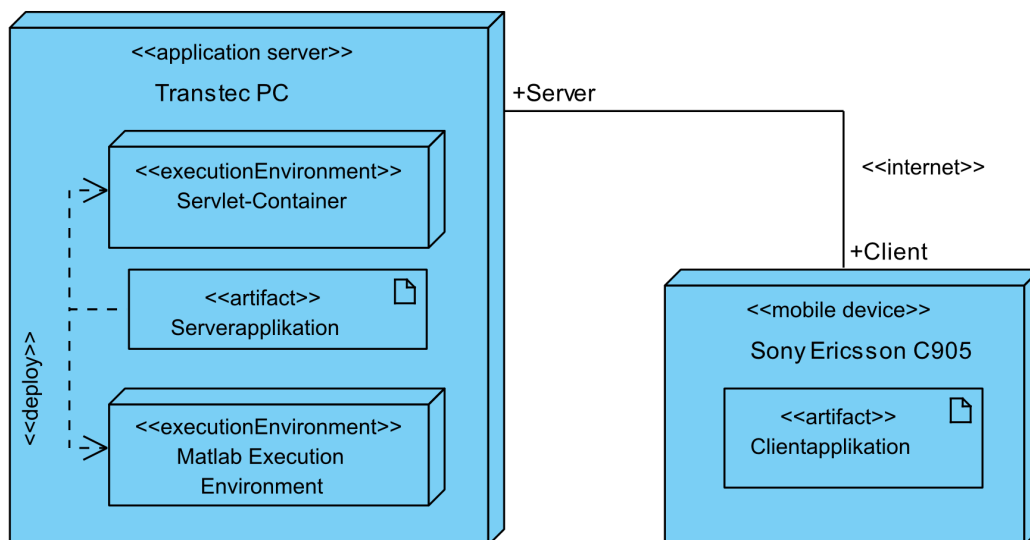


Abbildung 8.1: Verteilungsdiagramm

Für die Übertragung der Bilddaten zwischen Client und Server sowie die Weitergabe der Daten an Matlab liegen zwei in Java programmierte Anwendungen vor, eine Clientapplikation (*Java ME*) und eine Serverapplikation (*Java EE*). Für die drahtlose Kommunikation zwischen Server und Client ist eine Webserver-Umgebung auf dem PC installiert. Der Servlet-Container ist durch die Open-Source-Variante *Apache Tomcat* (Farley et al., 2003) realisiert.

## 8.2 Server

Über eine Serverapplikation bzw. ein Servlet (Farley et al., 2003) werden die Bilddaten vom mobilen Endgerät empfangen, an die Matlab-Umgebung weitergegeben und das Ergebnis der Auswertung wieder an das Smartphone zurückgeschickt.

Die Anfrage des Clients sowie Bild- und Sensordaten gelangen anhand eines *Hypertext Transfer Protocol* (HTTP) über das Netzwerk zum Server. Der Anfragetyp wird entschlüsselt und aus den empfangenen Daten das Bild sowie die Neigungswinkel der Kamera decodiert. Die ausgelesenen Neigungswinkel dienen in dieser Anwendung ausschließlich zur Bestimmung, ob es sich um ein Hoch- oder Querformat handelt. Für die Kernrechenprozesse wird die *Matlab Compiler Runtime* (MCR) genutzt.

Die MCR ist eine unabhängige Zusammenstellung verschiedener Bibliotheken, welche die Ausführung von Matlab-Dateien ermöglichen. Die Stärken von Matlab liegen in einer effizienten Durchführung numerischer Berechnungen sowie zahlreicher Applikationen (Toolboxen) spezieller Anwendungsgebiete. Für die Auswertung der Bilddaten gibt es in Matlab bereits eine entsprechende Bibliothek (*Image-Processing-Toolbox*), in der viele der in Kapitel 7 beschriebenen Algorithmen effizient umgesetzt sind. Daher wurde das Verfahren des OIPS zunächst in Matlab implementiert. Mit dem Matlab Builder JA (MATLAB Builder JA, 2011) werden dann aus dem Matlab-Code einzelne Klassen generiert, die zusammen mit der MCR in der Serverapplikation genutzt werden können.

Eine Übersicht über die einzelnen Matlab-Komponenten ist in Abbildung 8.2 gegeben.

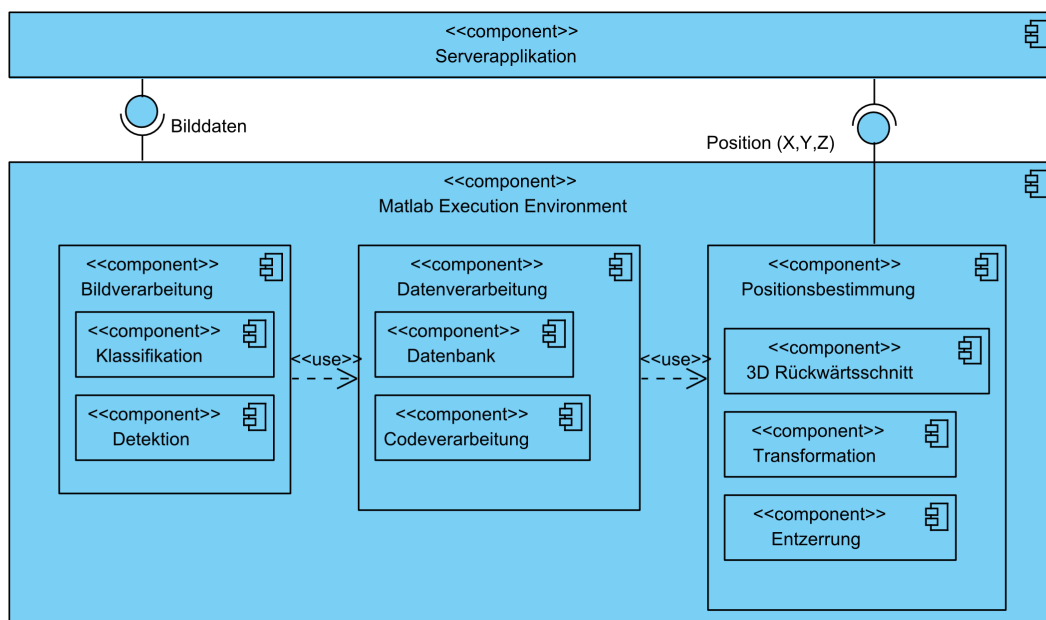


Abbildung 8.2: Komponentendiagramm der Matlab-Umgebung

Die Matlab-Umgebung beinhaltet drei Komponenten, *Bildverarbeitung*, *Datenverarbeitung* und *Positionsbestimmung*. Von der Serverapplikation wird die Komponente *Bildverarbeitung* aufgerufen und das auszuwertende Bild übergeben. Nun erfolgt der Klassifikations- sowie Detektionsprozess der Tür im Bild.

In *Klassifikation* und *Detektion* wird zum einen der Türcode im Bild gefunden und die codierte Rauminformation extrahiert und zum anderen die Bildkoordinaten der Türecken bestimmt. In der Komponente *Codeverarbeitung* wird aus dem Türcode ermittelt, um welche Tür im Gebäude es sich handelt und welche Seite der Tür aufgenommen wurde. Alle Türcodes sind in der Komponente *Datenbank* mit den dazugehörigen Türeckpunkten im Objektkoordinatensystem verknüpft, so dass anhand des Nummerncodes die korrespondierenden Objektkoordinaten der klassifizierten Tür abgefragt werden können. Die Komponente *Positionsbestimmung* berechnet aus den Punktkorrespondenzen die Position des Kamerastandpunktes in Objektkoordinaten und gibt diese wieder zurück an die Serverapplikation.

Die ermittelte Position wird in einer Gebäudekarte, die als *skalierbare Vektorgrafik* (SVG) vorliegt, gesetzt und an den Client geschickt.

### 8.3 Client

Die Clientapplikation, welche auf einem mobilen Endgerät installiert werden kann und die Aufnahme und das Senden der Bilddaten sowie das Empfangen des Ergebnisses ermöglicht, wurde in Java durch ein *MIDlet* (Breymann & Mosemann, 2006) realisiert. Der Aufbau der implementierten Clientapplikation auf dem C905 ist in Abbildung 8.3 dargestellt.

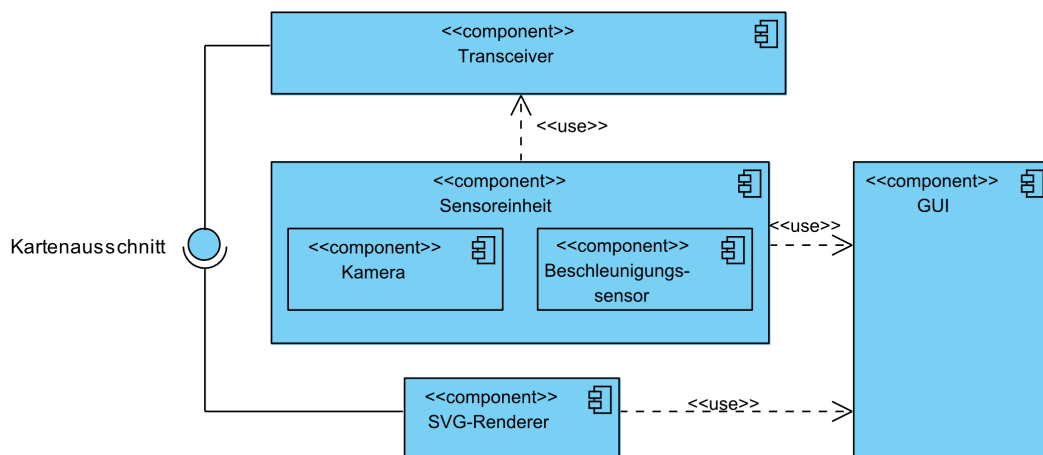


Abbildung 8.3: Komponentendiagramm der Client-Umgebung

Die *Kamera* sowie die *Beschleunigungssensoren* sind in der *Sensoreinheit* enthalten. Das aufgenommene Bild sowie die Neigungswinkel zum Zeitpunkt der Aufnahme werden an die Komponente *Transceiver* übergeben. Unabhängig davon können sowohl die Neigungswinkel als auch das Live-Bild über das GUI dargestellt werden. *Transceiver* formatiert das aufgenommene Bild um, so dass es über das Internet an den Server geschickt werden kann. Die ausgewertete Position wird in einem Kartenausschnitt (SVG-Format) wieder von *Transceiver* empfangen und an die Komponente *SVG-Renderer* weitergegeben. *SVG-Renderer* bereitet die Karteninformation für eine lauffähige Darstellung auf dem Smartphone auf und übergibt diese an das GUI, so dass dem Nutzer seine Position im Kartenausschnitt dargestellt wird.

## 8.4 Applikation

Das in Kapitel 3.2 vorgestellte Konzept wird als mobile Anwendung umgesetzt (siehe Abbildung 8.4). Bis auf die Positionsdarstellung auf dem Smartphone-Display kann das Konzept äquivalent in der Realität umgesetzt werden. Die Darstellung der Position auf dem Smartphone für den Prototyp erfolgte nicht, wie in Abbildung 3.3 dargestellt, drei- sondern zweidimensional als roter Punkt in einer SVG-Karte (Abbildung 8.4). Die Darstellung ließe sich auch durch Formate realisieren, die eine dreidimensionale Darstellung ermöglichen (Real Ehrlich, 2010), jedoch verzögert sich dadurch der Bildaufbau erheblich. Zudem kann eine 3D-Darstellung auf dem relativ kleinen Display eines Smartphones die Übersichtlichkeit mehr beeinträchtigen, als dass sie hilfreich ist. In Mulloni et al. (2009) wurden mehreren Besuchern einer Ausstellung sowohl 2D- als auch 3D-Darstellungen ihres aktuellen Aufenthaltsortes auf ihrem Smartphone zur Verfügung gestellt. Über 50 % der befragten Personen fanden die 2D-Darstellung durchaus sinnvoll, die 3D-Darstellung hingegen wurde von weniger als 40 % der Befragten als hilfreich empfunden.

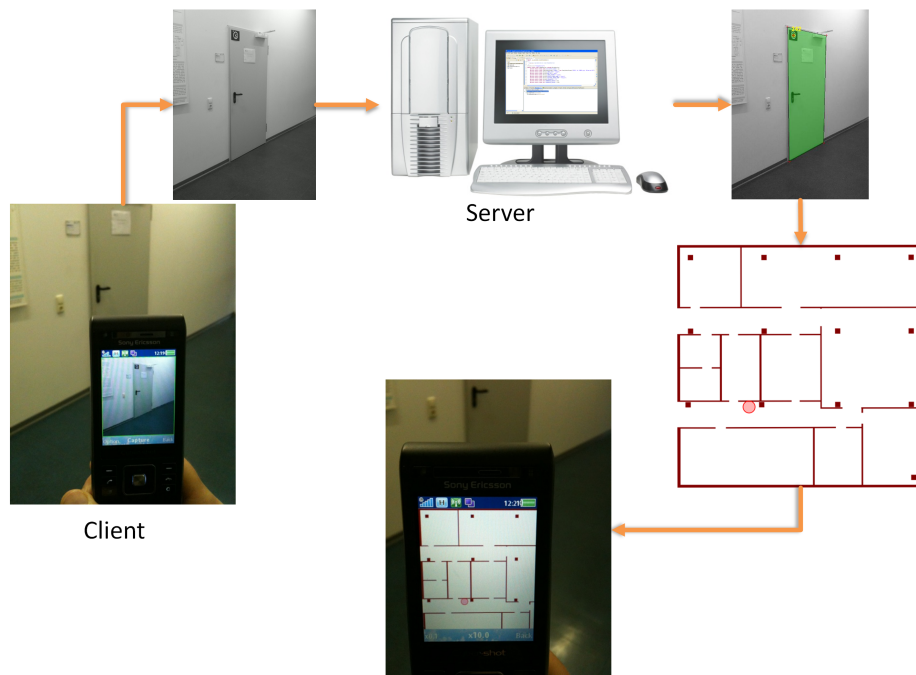


Abbildung 8.4: Ablaufskizze der realisierten OIPS-Anwendung



## 9 Evaluation des OIPS

Um empirisch zu evaluieren, inwieweit die Genauigkeit der Position in der Realität den theoretisch abgeleiteten Genauigkeiten entspricht und bis zu welchem Grad das System in der Praxis effizient eingesetzt werden kann, werden mit dem OIPS verschiedene Positionen in einer Testumgebung bestimmt. Als Testumgebung dient eine Etage des Geodätischen Instituts der Technischen Universität Darmstadt (Abbildung 9.1). Die Positionsbestimmung erfolgt in unterschiedlichen Aufnahmekonfigurationen und bei unterschiedlicher Beleuchtung.

Im Folgenden werden die relevanten Untersuchungsergebnisse dargestellt und diskutiert. Eine vollständige Übersicht aller Untersuchungen ist in Diefenbach (2011) aufgeführt. Zur Klassifikation wird die in Absatz 7.2.1 vorgestellte, robustere Klassifikationsmethode über Zielmarken eingesetzt. Als Testdatensätze werden auch Bilder aus dem in Absatz 7.3.1 verwendeten Datensatz genutzt, die von bekannten Standpunkten (Kontrollpunkten  $P_{K_i}$ ) aus aufgenommen wurden.

### 9.1 Aufbau einer Testumgebung

Die Objektkoordinaten der Türecken ( $X_i, Y_i, Z_i$ ) sowie verschiedener Kontrollpunkte  $P_{K_i} = (X_{K_i}, Y_{K_i}, Z_{K_i})$  in der Testumgebung (Abbildung 9.1) wurden im Vorfeld tachymetrisch bestimmt.

An die Türen werden die in Absatz 7.2.1 beschriebenen codierten Zielmarken angebracht. Die in den Zielmarken codierte Referenznummer wird dann in einer Datenbank auf dem Server zusammen mit den Türeckpunktkoordinaten der jeweiligen Tür abgespeichert (Tabelle 9.1).

Türnummerncode	Türkoordinaten [mm]		
244 Doppeltür innen	$X_1$	$Y_1$	$Z_1$
	$X_2$	$Y_2$	$Z_2$
	$X_3$	$Y_3$	$Z_3$
	$X_4$	$Y_4$	$Z_4$
242	$X_1$	$Y_1$	$Z_1$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$

Tabelle 9.1: Ausschnitt der Speicherung der Türdaten

Um die mittels des OIPS ermittelte Kameraposition später mit den Kontrollpunkten möglichst genau vergleichen zu können, wurde eine Vorrichtung angefertigt, mit der die Kamera möglichst zentrisch über den Kontrollpunkten aufgebaut werden kann (Abbildung 9.2).

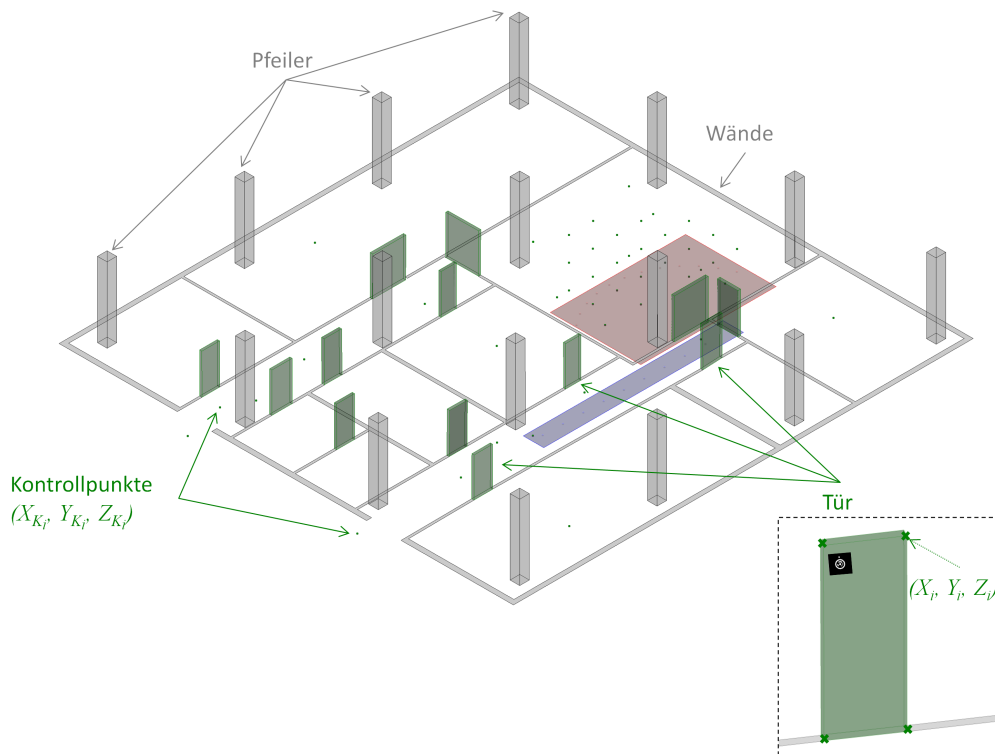


Abbildung 9.1: Testumgebung: Ostflügel L5/01, 2. Stock (blaue Markierung: Entfernungstestfeld, rote Markierung: Winkeltestfeld)

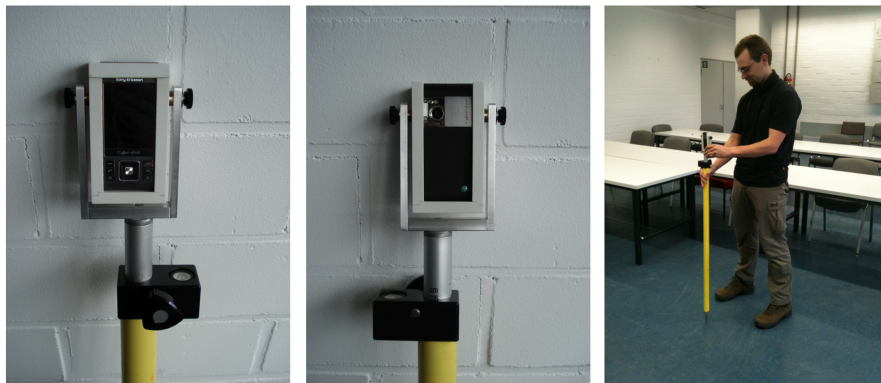


Abbildung 9.2: Stabstativ mit Fassung für die Kamera und Dosenlibelle zum Horizontieren

## 9.2 Zeitanalyse

In Tabelle 3.2 werden bereits die möglichen Dienste zur Datenübertragung über das Internet mit ihren theoretisch erreichbaren Übertragungsraten aufgezählt. Ein mit dem C905 aufgenommenes Grauwertbild hat eine Dateigröße von ca. 1,5 MB. Daher kann eine möglichst schnelle Datenübertragung nur über WLAN oder HSDPA bzw. HSUPA erfolgen. Für die Testumgebung wird WLAN zur Kommunikation mit dem Server genutzt, da es derzeit theoretisch die höchsten Übertragungsraten ermöglicht.

Die Übertragungsdauer, d. h. die Summe der Zeit von der Anfrage bis zum abgespeicherten Bild auf dem Server und der Zeit für das Zurücksenden der Ergebnismap mit eingetragener Position und Darstellung auf dem Display des Smartphone beträgt etwa 22 sec.

Die Verarbeitung des Bildes und die Positionsbestimmung dauern 24-28 sec, wobei die Positionsbestimmung dabei nur wenige 0,01 sec benötigt.

Damit beträgt der komplette Positionierungsprozess momentan ca. 50 sec (siehe Abbildung 9.3). Allerdings muss hierbei berücksichtigt werden, dass es sich um einen Prototyp der Anwendung handelt.



Abbildung 9.3: Zeitbalken der Prozesskette des realisierten OIPS

Es ist denkbar, dass die Prozesszeit der Bildverarbeitung durch Programmierung in einer effizienteren Programmiersprache wie *C++* noch beschleunigt werden kann. Im Moment sind die Verarbeitungsprozesse in Matlab umgesetzt worden. Die Geschwindigkeit der Datenübertragung ist abhängig von der Leistung der Standards. Theoretisch dürfte die Übertragung einer knapp 1 MB großen Bilddatei mit der in Tabelle 3.2 angegebenen Übertragungsrate von mindestens 11 MBit/s etwa 1,4 sec dauern. Die tatsächliche Übertragungsrate, die mit dem C905 in der mit WLAN ausgestatteten Testumgebung derzeit erreicht werden kann, beträgt allerdings nur 560 kBit/s, d. h. für eine 1 MB große Datei werden etwa 14 sec benötigt. In Zukunft kann jedoch auch in der Praxis mit noch schnelleren Übertragungsraten, z. B. durch neue Mobilfunkstandards (z. B. *Long Term Evolution* (LTE)), gerechnet werden, so dass die Datenübertragung zukünftig noch beschleunigt werden könnte.

### 9.3 Positionsanalyse

In Absatz 7.3.3 wird bereits eine Aussage darüber getroffen, wie verzerrt die Tür im Bild vorliegen darf und welche Entfernung zur Tür maximal möglich ist, um die Tür noch korrekt detektieren und klassifizieren zu können. Weiterhin ist untersucht worden, wie sich absolute Dunkelheit auf die Identifizierung der Türen auswirkt. Die möglichen Kamerapositionen, von denen die Tür korrekt detektiert und klassifiziert sowie die Bildpunkte der Türecken im Rahmen der Messgenauigkeit richtig extrahiert werden, sind ebenfalls in Abschnitt 7.3.3 bestimmt. Allerdings ist dort noch nicht überprüft worden, wie gut die Position nun tatsächlich aus den bestimmten Punktkorrespondenzen ermittelt werden kann. Daher wird die Position in unterschiedlichen Konfigurationen zur Tür (auf bekannten Kontrollpunkten) jeweils zehnmal ermittelt und aus den Ergebnissen der Helmert'sche Punktfehler  $s_P$  als Maß der inneren Genauigkeit sowie die mittlere Punktabweichung  $d_P$  zur Beurteilung der äußeren Genauigkeit bestimmt.

### 9.3.1 Schrägstellung

Für die Untersuchungen des Einflusses seitlicher Aufnahmestellungen zur Tür werden Kontrollpunkte abgesteckt, die auf einem Radius von 4 m um die Tür mit einem Winkelabstand von  $10^\circ$  verteilt sind (Abbildung 9.4).

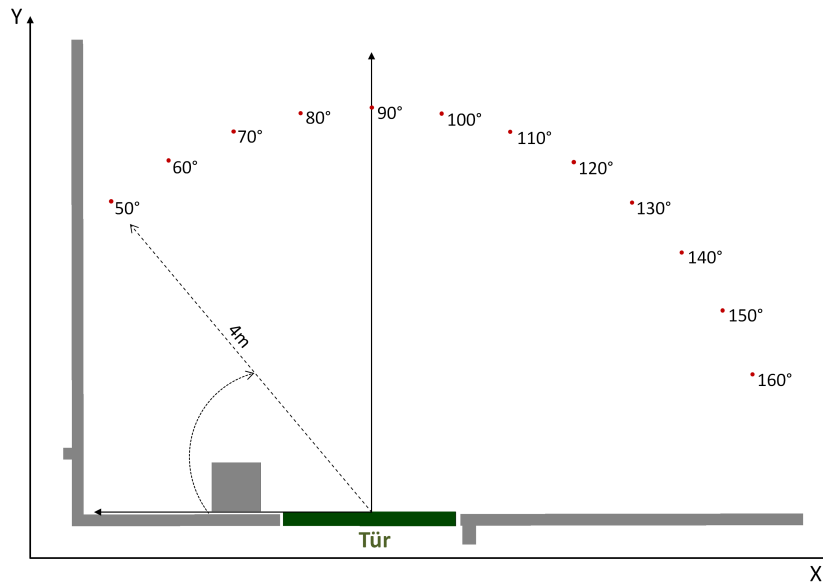


Abbildung 9.4: Winkeltestfeld für Untersuchung verschiedener seitlicher Aufstellungen zu einer Tür

Von jedem Kontrollpunkt des Winkelfeldes wird die Tür mit der Kamera des C905 zehnmal aufgenommen und die Streuung  $s_P$  sowie die absolute mittlere Abweichung  $d_P$  ermittelt. Diese empirisch ermittelten Positionen werden mit denen aus einer Simulationsrechnung verglichen. In dem simulierten Winkelfeld-Szenario werden die einzelnen Positionen 100 mal bestimmt. Dabei wird auf die wahren Bildkoordinaten ein Gauß'sches Rauschen mit einer Standardabweichung  $s_0 = 15$  px addiert. Dieser Wert wurde gewählt, um die Simulation bestmöglich an den Realfall anzupassen. Die Testergebnisse der Untersuchungen in Kapitel 7 haben ergeben, dass die Türecken im Bild mit den vorgestellten Extraktionsmethoden mit einer Genauigkeit von 7 px detektiert werden können (siehe Tabelle 7.7). Damit ist die Schätzung der Bildkoordinaten in der Simulation mit  $s_0 = 15$  px zwar pessimistischer, allerdings werden dafür ausschließlich die Bildkoordinaten verändert. Die Ergebnisse sind in den Tabellen 9.2 und 9.3 dargestellt.

Die Ergebnisse der Simulation zeigen, dass die Wiederfindung der Position in den Randbereichen am schlechtesten ist. Der Helmert'sche Punktfehler sowie die mittlere Punktabweichung liegen immer im Bereich  $\leq 7$  cm.

Im realen Winkeltestfeld streuen die OIPS-Lösungen bis zu 3,6 cm um ihren Mittelwert. Die größten absoluten mittleren Abweichungen  $d_P$  tauchen an den Rändern auf und liegen maximal bei 21,9 cm, wobei die Randpositionen bei der empirischen Messung bei einer Schrägaufnahme von  $30^\circ$  liegen (entspricht Punkt  $150^\circ$ , Tabelle 9.3).

$P_{K_i}$	$\Delta\bar{X}_{0_i}$ [cm]	$\Delta\bar{Y}_{0_i}$ [cm]	$\Delta\bar{Z}_{0_i}$ [cm]	$d_P$ [cm]	$s_P$ [cm]
50°	1,3	-0,8	0,1	1,5	3,0
60°	0,8	-0,6	-0,1	1,0	2,8
70°	0,8	-1,2	-0,6	1,6	2,9
80°	0,7	-1,2	0,8	1,6	2,6
90°	2,3	-1,3	0,2	2,7	2,7
100°	-0,6	-1,6	-3,0	3,4	2,5
110°	-0,2	-1,5	-2,1	2,6	2,5
120°	0,7	-1,8	0,7	2,1	2,7
130°	-0,5	-1,6	1,3	2,1	2,7
140°	-0,2	-2,4	-0,3	2,4	3,0
150°	-1,5	-5,7	-3,7	7,0	3,5
160°	-5,5	2,1	-0,2	5,9	5,4

Tabelle 9.2: Ergebnisse aus simuliertem Winkelfeld

$P_{K_i}$	$\Delta\bar{X}_{0_i}$ [cm]	$\Delta\bar{Y}_{0_i}$ [cm]	$\Delta\bar{Z}_{0_i}$ [cm]	$d_P$ [cm]	$s_P$ [cm]
50°	5,3	-9,6	-0,2	11,0	1,5
60°	4,6	3,4	-1,5	5,9	3,1
70°	2,9	0,3	-3,3	4,4	3,6
80°	-1,0	-2,9	-2,6	4,0	2,8
90°	0,2	-3,3	4,9	6,0	2,7
100°	1,5	-4,2	4,3	6,2	2,5
110°	-5,2	-0,6	1,4	5,4	3,1
120°	-2,8	-1,8	3,7	5,0	2,5
130°	-4,4	0,9	-1,6	4,8	3,0
140°	-4,2	3,2	5,6	7,7	2,8
150°	-7,0	16,9	12,0	21,9	3,1
160°	—	—	—	—	—

Tabelle 9.3: Testergebnisse aus realem Winkelfeld

Tendenziell scheinen die empirisch ermittelten Varianzen der Koordianten aus Simulation  $(s_{(X,Y,Z)_{0i}}^2)_S$  und realem Testfeld  $(s_{(X,Y,Z)_{0i}}^2)_R$  einander zu entsprechen. Für diese Annahme werden die Hypothesen

$$\begin{aligned} \text{Hypothese } H_0 : (s_{(X,Y,Z)_{0i}}^2)_S &= (s_{(X,Y,Z)_{0i}}^2)_R \\ \text{Alternativhypothese } H_A : (s_{(X,Y,Z)_{0i}}^2)_S &\neq (s_{(X,Y,Z)_{0i}}^2)_R \end{aligned} \quad (9.1)$$

aufgestellt und auf einem Signifikanzniveau von  $\alpha = 5\%$  mittels Fischer-Test geprüft (Niemeier, 2002):

$$\text{Testgröße: } F = \frac{(s_{(X,Y,Z)_{0i}}^2)_S}{(s_{(X,Y,Z)_{0i}}^2)_R}. \quad (9.2)$$

$$\begin{aligned} \text{Testentscheidung für } H_0: F_{f_1;f_2;\alpha/2} \leq F \leq F_{f_1;f_2;1-\alpha/2}, \\ F_{99;9;2,5\%} \leq F \leq F_{99;9;97,5\%}. \end{aligned} \quad (9.3)$$

Die Ergebnisse für jeden Punkt sind in Tabelle 9.4, linke Hälfte, aufgeführt. Für alle Punkte musste die Hypothese  $H_0$  verworfen werden. Dass die empirischen Varianzen aus der Simulation nicht mit der Realität übereinstimmen kann folgende Gründe haben: Im Gegensatz zu 100 simulierten Messungen haben in der Praxis nur 10 Realisierungen für jeden Standpunkt stattgefunden. Theoretisch werden unterschiedliche Stichprobenumfänge im Fischer-Test berücksichtigt. Allerdings beruht der Fischer-Test auf der Annahme, dass die Stichproben normalverteilt vorliegen. Diese Annahme kann jedoch weder für die Simulation noch für die realen Testmessungen getroffen werden. In Kapitel 5 wurde bereits gezeigt, dass Gauß-verrauschte Bildkoordinaten nicht zwangsläufig zu einer Normalverteilung in der Streuung der Position führen. Für die realen Testmessungen wurden nur 10 Messungen durchgeführt. Diese geringe Anzahl beweist ebenfalls noch keine Normalverteilung in der Streuung der Testmessungen. Des weiteren werden im Falle der Simulation ausschließlich die Bildkoordinaten durch normalverteiltes Gauß'sches Rauschen verändert. In der Realität ist die Streuung der Bildkoordinaten jedoch unbekannt und aufgrund zusätzlicher Abweichungen durch Fehldetektionen kann ebenfalls nicht von normalverteiltem Rauschen ausgegangen werden. Außerdem treten im realen Testfeld zusätzlich Abweichungen in den Objektkoordinaten der Türeckpunkte sowie der innere Orientierung der Kamera auf, wodurch der Helmert'sche Punktfehler  $s_P$  noch verstärkt, aber auch verringert werden kann.

Die Hypothese bezüglich der Gleichheit der Koordinatenabweichungen in Simulation und realem Testfeld

$$\begin{aligned} \text{Hypothese } H_0 : (d_{(X,Y,Z)_{0i}})_S &= (d_{(X,Y,Z)_{0i}})_R \\ \text{Alternativhypothese } H_A : (d_{(X,Y,Z)_{0i}})_S &\neq (d_{(X,Y,Z)_{0i}})_R \end{aligned} \quad (9.4)$$

wird mittels Student-Test geprüft (Niemeier, 2002):

$$\text{Testgröße: } t_{f'} = \frac{(d_{(X,Y,Z)_{0i}})_S - (d_{(X,Y,Z)_{0i}})_R}{\sqrt{(s_{(\bar{X},\bar{Y},\bar{Z})_{0i}}^2)_S + (s_{(\bar{X},\bar{Y},\bar{Z})_{0i}}^2)_R}}. \quad (9.5)$$

$$\text{Testentscheidung für } H_0: t_{f';\alpha/2} \leq t_{f'} \leq t_{f';1-\alpha/2}, \quad (9.6)$$

mit  $f'$  = wirksamer Freiheitsgrad, der aus den Freiheitsgraden  $f_S$  und  $f_R$  und den Standardabweichungen  $(s_{(\bar{X},\bar{Y},\bar{Z})_{0i}})_S$  und  $(s_{(\bar{X},\bar{Y},\bar{Z})_{0i}})_R$  berechnet wird (siehe Niemeier (2002)).

Für die meisten Punkte kann die Gleichheit zwischen Simulation und realem Testfeld nicht signifikant

( $\alpha = 5\%$ ) bestätigt werden (Tabelle 9.4, rechte Hälfte). Dass die mittleren Punktabweichungen  $d_P$  im Realfall (Tabelle 9.3) größer ausfallen als in der Simulation (Tabelle 9.2), liegt an den teilweise größeren Abweichungen der Bildkoordinaten z. B. durch Fehldetektionen.

$P_{K_i}$	$s_{X_{0i}}^2$	$s_{Y_{0i}}^2$	$s_{Z_{0i}}^2$	$d_{X_{0i}}$	$d_{Y_{0i}}$	$d_{Z_{0i}}$
50°	$H_A$	$H_A$	$H_A$	$H_A$	$H_A$	$H_0$
60°	$H_A$	$H_A$	$H_A$	$H_0$	$H_0$	$H_0$
70°	$H_A$	$H_A$	$H_A$	$H_0$	$H_0$	$H_0$
80°	$H_A$	$H_A$	$H_A$	$H_0$	$H_A$	$H_0$
90°	$H_A$	$H_A$	$H_A$	$H_0$	$H_A$	$H_0$
100°	$H_A$	$H_A$	$H_A$	$H_0$	$H_A$	$H_0$
110°	$H_A$	$H_A$	$H_A$	$H_A$	$H_0$	$H_0$
120°	$H_A$	$H_A$	$H_A$	$H_0$	$H_0$	$H_0$
130°	$H_A$	$H_A$	$H_A$	$H_A$	$H_0$	$H_0$
140°	$H_A$	$H_A$	$H_A$	$H_A$	$H_0$	$H_A$
150°	$H_A$	$H_A$	$H_A$	$H_A$	$H_A$	$H_A$

Tabelle 9.4: Nicht verworfene Hypothese (9.1) und (9.4) im Winkelfeld

### 9.3.2 Entfernung

Um zu untersuchen, welchen Einfluss unterschiedliche Entfernungen zum georeferenzierten Objekt auf die Positionsbestimmung haben, wird ein Entfernungstestfeld mit Kontrollpunkten im Abstand 3, 4, ... 8, 9 m zur Tür angelegt (Abbildung 9.5).

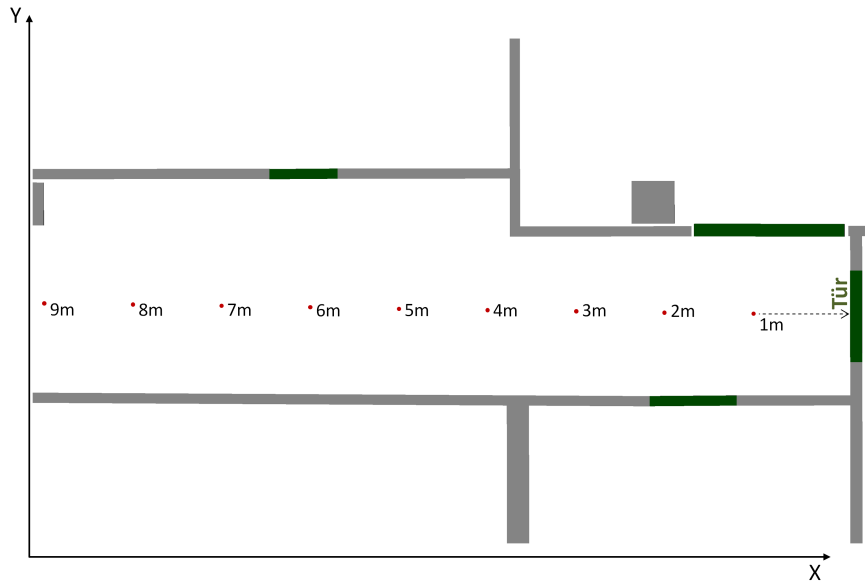


Abbildung 9.5: Entfernungstestfeld

Wie auch bei den Untersuchungen zum Winkeleinfluss (Abschnitt 9.3.1) wird die Tür mit der Kamera des C905 zehnmal von jedem Kontrollpunkt aus aufgenommen und der Helmert'sche Punktfehler  $s_P$  bzw. die mittlere Punktabweichung  $d_P$  ermittelt. Auch im Entfernungsfeld-Szenario werden 100 Aufnahmen pro Kontrollpunkt simuliert, wobei auch hier auf die Bildkoordinaten der Türecken Gauß'sches Rauschen addiert wird ( $s_0 = 15$  px). Die Ergebnisse sind in Tabelle 9.5 und 9.6 dargestellt.

$P_{K_i}$	$\Delta \bar{X}_{0_i}$ [cm]	$\Delta \bar{Y}_{0_i}$ [cm]	$\Delta \bar{Z}_{0_i}$ [cm]	$d_P$ [cm]	$s_P$ [cm]
3 m	-1,2	-1,0	-0,0	1,6	1,9
4 m	-2,5	2,5	3,4	4,9	4,1
5 m	-9,2	3,1	2,6	10,0	8,3
6 m	-20,8	4,7	10,1	23,6	13,3
7 m	-32,9	-4,6	-3,3	33,4	17,5
8 m	-76,4	-5,4	28,1	81,6	28,0
9 m	-135,3	14,6	-8,1	136,3	38,4

Tabelle 9.5: Ergebnisse aus simuliertem Entfernungsfeld

Die Simulationen zeigen eine starke Zunahme sowohl von  $s_P$  als auch von  $d_P$  mit zunehmendem Abstand von der Tür. Bei einem Abstand von 9 m streuen die Lösungen mit 38 cm um ihren Mittelwert, die absolute



$P_{K_i}$	$\Delta \bar{X}_{0i}$ [cm]	$\Delta \bar{Y}_{0i}$ [cm]	$\Delta \bar{Z}_{0i}$ [cm]	$d_P$ [cm]	$s_P$ [cm]
3 m	-3,9	-7,1	8,6	11,9	2,0
4 m	-3,7	-9,4	12,9	16,4	4,0
5 m	-2,7	-14,1	15,4	21,1	6,1
6 m	-4,5	-17,4	6,6	19,2	6,5
7 m	-6,6	-20,0	-8,3	22,6	4,0
8 m	-5,3	-44,6	-39,8	60,0	11,6
9 m	-10,6	-62,1	-22,0	66,7	12,2

Tabelle 9.6: Testergebnisse aus realem Entfernungsfeld

mittlere Abweichung beträgt 1,36 m. Zufriedenstellende Ergebnisse mit einer mittleren Abweichung von etwa 0,3 m können nur bis zu einem Abstand von 7 m erreicht werden.

Auch im Experiment ist die mittlere Punktabweichung stark korreliert mit der Entfernung. In einer Entfernung von 6 m nimmt die Streuung geringfügig ab. Dies kann unter anderem an günstigeren Beleuchtungsverhältnissen liegen. Die Beleuchtung war aufgrund unterschiedlich heller Leuchtstoffröhren entlang des Entfernungsfeldes nicht immer einheitlich. In einer Entfernung von 9 m liefert die Lösung mit knapp 0,67 m erwartungsgemäß die maximale mittlere Punktabweichung.

Vergleicht man die empirischen Varianzen und Punktabweichungen zwischen simuliertem und realem Testfeld, verhalten sich die Ergebnisse im Realfall wie auch im Winkeltestfeld nicht erwartungstreu (siehe Ergebnisse der Hypothesentests in Tabelle 9.7).

$P_{K_i}$	$s_{X_{0i}}^2$	$s_{Y_{0i}}^2$	$s_{Z_{0i}}^2$	$d_{X_{0i}}$	$d_{Y_{0i}}$	$d_{Z_{0i}}$
3 m	$H_A$	$H_A$	$H_A$	$H_0$	$H_A$	$H_0$
4 m	$H_A$	$H_A$	$H_A$	$H_A$	$H_A$	$H_0$
5 m	$H_A$	$H_A$	$H_0$	$H_A$	$H_A$	$H_0$
6 m	$H_A$	$H_0$	$H_0$	$H_A$	$H_A$	$H_A$
7 m	$H_A$	$H_0$	$H_0$	$H_A$	$H_A$	$H_A$
8 m	$H_A$	$H_A$	$H_0$	$H_A$	$H_A$	$H_A$
9 m	$H_A$	$H_0$	$H_0$	$H_A$	$H_A$	$H_A$

Tabelle 9.7: Nicht verworfene Hypothese (9.1) und (9.4) im Entfernungsfeld

Teilweise können in der Praxis bessere Ergebnisse erzielt werden als a priori angenommen. Beim Vergleich der Abweichungen in den einzelnen Koordinatenrichtungen liegen die größten Abweichungen im Realfall in Y-Richtung, während im Simulationsfall die X-Koordinate am meisten verfälscht wird.

Analog zum Winkeltestfeld muss auch hier berücksichtigt werden, dass in der Praxis nur 10 Realisierungen für jeden Standpunkt stattgefunden haben (unzureichende Anzahl, um Normalverteilung annehmen zu

können) und bei der Streuung der Position generell nicht von einer Normalverteilung ausgegangen werden kann.

### 9.3.3 Beleuchtung

Für den Einfluss unterschiedlicher Beleuchtungsverhältnisse werden im Winkeltestfeld von den Standpunkten  $90^\circ$  und  $150^\circ$  zu unterschiedlichen Tageszeiten nur mit natürlichem Umgebungslicht, bei eingeschalteter Zimmerbeleuchtung sowie zusätzlicher Beleuchtung mittels Baustrahler jeweils 10 Türaufnahmen getätigt und ausgewertet, siehe Tabelle 9.8.

$P_{K_i}$	$\Delta X_{0_i}$ [cm]	$\Delta Y_{0_i}$ [cm]	$\Delta Z_{0_i}$ [cm]	$d_P$ [cm]	$s_P$ [cm]
$90^\circ$ morgens	1,3	-2,8	-3,3	4,5	3,6
$90^\circ$ mittags	1,9	-3,0	-1,8	4,0	2,3
$90^\circ$ abends	-1,0	-5,6	6,9	8,9	3,9
$90^\circ$ (Raumlicht)	0,2	-3,3	4,9	6,0	2,7
$90^\circ$ (Baustrahler)	2,9	-3,6	-0,8	4,6	2,3
$150^\circ$ morgens	-5,4	9,2	0,0	10,7	4,4
$150^\circ$ mittags	-4,5	2,7	4,4	6,9	3,2
$150^\circ$ abends	-5,3	14,9	-1,1	15,8	3,1
$150^\circ$ (Raumlicht)	-7,0	16,9	12,0	21,9	3,1
$150^\circ$ (Baustrahler)	-5,5	8,7	6,2	12,0	3,6

Tabelle 9.8: Testergebnisse bei unterschiedlichen Lichtverhältnissen

Bei günstiger Standpunktwahl ( $90^\circ$ ) ist unabhängig von der Beleuchtung immer eine gute Wiederfindung der Koordinaten der Türecken gegeben. Bei abnehmender Beleuchtungsstärke (abends) ist sie zwar schlechter, liegt aber immer noch im Bereich  $d_P \leq 10$  cm. Die mittlere Punktabweichung ist auf Punkt  $150^\circ$  morgens und abends etwa doppelt so groß wie mittags und kann auch durch zusätzliche Beleuchtung nicht verbessert werden. In der Mittagszeit scheint das natürliche Umgebungslicht den Ergebnissen zufolge die günstigsten Lichtverhältnisse für das OIPS zu liefern. Das künstliche Ausleuchten der Szene mit dem Baustrahler liefert nicht zwangsläufig die günstigsten Lichtverhältnisse für das OIPS. Die Streuung der Positionslösung zeigt sowohl bei  $90^\circ$  als auch bei  $150^\circ$  keine auffälligen Veränderungen bei unterschiedlichen Lichtverhältnissen. Ungünstigere Lichtverhältnisse verursachen offenbar einen systematischen Fehler, wie etwa ein systematisch falsches Detektieren einer Türkante.

### 9.3.4 Allgemeine Testmessungen

Für eine aussagekräftige Beurteilung der Anwendbarkeit des OIPS wird im gesamten Bereich der Testumgebung (Abbildung 9.1) jeweils eine Aufnahme auf 47 verschiedenen Kontrollpunkten gemacht und ausgewertet (Abbildung 9.6). Nicht für alle Kontrollpunkte kann die Position mit dem OIPS bestimmt

werden, da manche von den umliegenden Türen zu weit entfernt liegen oder zu nah sind, so dass die Türen nicht vollständig im Bild erfasst werden können (z. B. Punkte 101, 109). Weiterhin schlägt die Auswertung fehl, wenn die Türen unter einem zu flachen Winkel aufgenommen werden, wie z. B. bei Aufnahme der Tür 242 von Punkt 106 aus oder der Aufnahme von Tür 247N von Punkt 110 aus. 5 von 47 Positionen können daher nicht ausgewertet werden.

Die Ergebnisse der erfolgreichen Positionsbestimmung sind in Tabelle 9.9 dargestellt. Die Punktabweichungen  $d_P$  der mittels OIPS berechneten Positionen von den Kontrollpunkten liegt im Mittel bei etwa 30 cm. Bei 3 von 42 Punkten (100, 111 und 105) kommt es zu einer Punktabweichung von  $> 1$  m (siehe orangefarbene Pfeile in Abbildung 9.6). Der größte Ausreißer in Punkt 105 mit  $d_P=2,07$  m liegt an der falschen Kantendetektion in diesem Bild. Dabei hat eine Glastür, die den Flur der Testumgebung vom westlichen Gebäudeabschnitt trennt, zu Spiegelreflexen im Bild geführt. Bei Punkt 111 konnte die Tür nicht vollständig erfasst werden, so dass hier eine falsche Kante als Türkante angenommen wurde. Punkt 100 ist von der aufgenommenen Tür 242 b 9,40 m entfernt. Aus dem Entfernungstestfeld ergibt sich bereits bei 9 m eine Punktabweichung von 66,7 cm.

Bei den übrigen Auswertungen liegen die Ergebnisse immer unter 0,5 m. Auch in den beiden Büroräumen (siehe Lageplan, Abbildung 9.6) kann mit dem OIPS erfolgreich positioniert werden. Da in diesen Räumen keine Kontrollpunkte vorliegen, kann in diesen Fällen die im Rahmen der Messgenauigkeit korrekte Positionierung nur durch Darstellung im Lageplan (orangefarbene Kreuze) verifiziert werden.

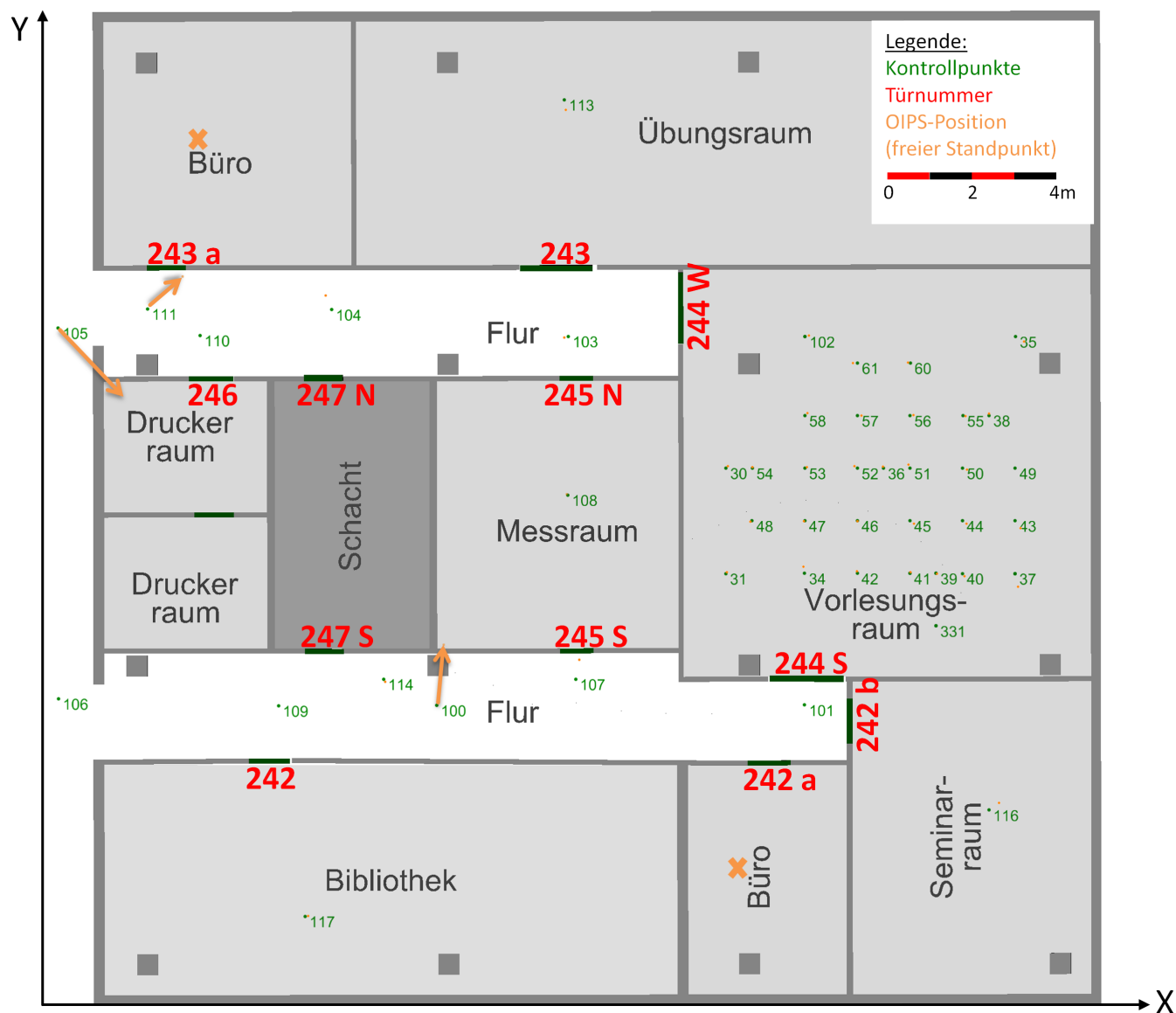


Abbildung 9.6: Lageplan der Testumgebung

$P_{K_i}$	aufgenommene Tür	$\Delta X_{0_i}$ [cm]	$\Delta Y_{0_i}$ [cm]	$\Delta Z_{0_i}$ [cm]	$d_P$ [cm]
30	244 <i>S</i>	-4,2	-4,5	19,5	20,4
31	244 <i>S</i>	-2,3	-3,0	24,7	25,0
34	244 <i>S</i>	2,4	-14,6	43,5	45,9
35	244 <i>S</i>	-19,1	11,1	-16,4	27,5
36	244 <i>S</i>	1,2	-3,7	18,1	18,5
37	244 <i>S</i>	-6,3	30,2	28,0	41,7
38	244 <i>S</i>	-0,3	-3,8	-17,8	18,2
39	244 <i>S</i>	-1,3	0,6	18,0	18,0
40	244 <i>S</i>	-4,3	6,8	23,7	25,1
41	244 <i>S</i>	-1,4	-2,2	27,7	27,9
42	244 <i>S</i>	0,4	-4,5	28,5	28,8
43	244 <i>S</i>	-11,8	17,0	29,6	36,1
44	244 <i>S</i>	-8,8	6,8	24,9	27,2
45	244 <i>S</i>	-9,4	6,9	25,9	28,4
46	244 <i>S</i>	-0,4	0,6	25,0	25,0
47	244 <i>S</i>	1,8	0,4	26,3	26,3
48	244 <i>S</i>	3,7	2,2	16,0	16,6
50	244 <i>S</i>	-10,1	2,8	14,5	17,9
51	244 <i>S</i>	4,0	-8,8	23,1	25,1
52	244 <i>S</i>	6,2	-4,9	13,0	15,3
53	244 <i>S</i>	-4,8	-2,0	22,2	22,8
54	244 <i>S</i>	-0,5	-2,6	21,5	21,7
55	244 <i>S</i>	-6,7	0,4	6,4	9,3
56	244 <i>S</i>	-8,1	-1,0	6,2	10,3
57	244 <i>S</i>	-8,5	0,4	-0,4	8,5
58	244 <i>S</i>	-5,4	-5,5	8,3	11,3
60	244 <i>S</i>	4,9	-1,0	-24,3	24,8
61	244 <i>S</i>	10,3	-0,2	-27,2	29,0
100	242 <i>b</i>	17,0	138,7	1,1	139,8
102	244 <i>S</i>	-8,3	-2,9	-5,2	10,2
103	244 <i>W</i>	9,2	2,6	25,0	26,8
104	246	13,6	-32,5	34,7	49,5
105	243 <i>a</i>	-140,0	151,9	17,8	207,3
107	242 <i>b</i>	-8,3	-44,4	20,0	49,4
108	245 <i>N</i>	2,0	2,0	11,7	12,1
111	246	79,9	73,9	25,9	111,9
113	243	-2,8	22,8	31,3	38,9
114	242	-3,6	6,0	31,1	31,8
116	242 <i>b</i>	-22,5	-16,8	36,4	45,9
117	242	-7,1	-1,0	32,3	33,1

Tabelle 9.9: Testergebnisse der Einzelmessungen in der gesamten Testumgebung



## 10 Bewertung der Ergebnisse und Anwendungsanalyse

### 10.1 Messdatenakquise

Die Messdatenakquise kann aufgeteilt werden in die Klassifikation der Türen im Bild bzw. die Akquise der Objektkoordinaten der Türecken und in die Extraktion (Akquise) der korrespondierenden Bildkoordinaten.

**Detektions- und Klassifikationsergebnisse:** Sowohl die Detektion als auch die Klassifikation können nur über das Maß der Robustheit bewertet werden, denn entweder wird die Tür korrekt detektiert bzw. klassifiziert oder nicht. Die Genauigkeit der Objektkoordinaten ist durch das vorher gegebene Gebäudemodell festgelegt und kann nicht verbessert werden. Die Ergebnisse in den Tabellen 7.3/7.4 und 7.5/7.6 zeigen, dass die Detektion und Klassifikation über Zielmarken mit einer Trefferquote von 77% bzw. 68% und einer Fehlerquote von 0% durchaus für das OIPS geeignet ist. Die Referenzbildmethode hingegen kann alleine nicht für eine korrekte Türerkennung verwendet werden. Diese Variante erscheint zwar anwendungsfreundlicher, da hier die Umgebung nicht verändert wird, allerdings kann sie mit einer Trefferquote von 56% und einer Fehlerquote von 67% bzgl. der Klassifikation nicht als robust bezeichnet werden und wäre für den praktischen Einsatz nicht ausreichend.

**Genauigkeit der Koordinatenbestimmung im Bild:** Die Extraktion der Türeckpunktkoordinaten liefert mit einer mittleren Abweichung von 10 bzw. 13 px (siehe Tabelle 7.7) die Voraussetzung für eine Positionsgenauigkeit von wenigen cm (siehe Abschnitt 5.2). Allerdings zeigt der Algorithmus noch Schwächen bezüglich ungünstiger Lichtverhältnisse oder störender Objekte. Dadurch kann es zu Ausreißern kommen, die momentan noch nicht automatisch aufgedeckt und berücksichtigt werden können (z. B. Aufnahme für Punkt 105, Absatz 9.3.4). Durch Darstellung der extrahierten Türeckpunkte im Bild könnte eine falsche Detektion erkannt und die Aufnahme vom Nutzer verworfen werden.

### 10.2 Positionsgenauigkeit

Die Ergebnisse der Positionsbestimmung in Abschnitt 9.3 zeigen keine streng signifikante Übereinstimmung mit den theoretischen Überlegungen. Dennoch zeigen die Positionslösungen im Winkel- und Entfernungsfeld sowohl für die Simulationen als auch den Realfall, dass mit zunehmender Entfernung oder größer werdender Schrägstellung zur Tür die äußere Genauigkeit der Position abnimmt. Auch die Größenordnung der Positionsabweichungen stimmt mit den theoretischen Abschätzungen überein.

In der Realität gibt es noch weitere Einflüsse, wie z. B. die Genauigkeit der Objektkoordinaten. Diese wurden in der Theorie nur isoliert behandelt. In den praktischen Tests führen diese zusätzlichen Einflüsse zu Positionsabweichungen, die im Mittel bei  $d_P \approx 35$  cm liegen. Dadurch fallen die Abweichungen in der Praxis verglichen zu den theoretischen Abschätzungen tendenziell größer aus. Dennoch erfüllen die Ergebnisse der praktischen Tests die Ansprüche an ein approximatives Positionierungssystem hinreichend. Präzisere Ergebnisse sind möglich, können allerdings nicht gewährleistet werden.

### 10.3 Mögliche Ergänzungen

**Verbesserung der Implementierung:** Gerade die automatisierte Detektion einer Tür im Bild zeigt eine noch nicht gänzlich zufriedenstellende Lösung. Durch eine Kontrolle der Geometrie des detektierten Tür-Vierecks könnte die Detektion in manchen Fällen noch verbessert werden. Eine Möglichkeit besteht darin, das aufgenommene Bild mit einem Referenzbild der Tür aus der Datenbank zu vergleichen und zu überprüfen, wie gut die beiden Bilder korrelieren. Alternativ könnten, wie bereits in Kapitel 10 erwähnt, die detektierten Bildpunkte durch den Anwender kontrolliert werden, indem das Zwischenergebnis (das Türbild mit eingetragenen Eckpunkten) angezeigt wird. Allerdings muss man sich im Klaren sein, dass die genannten Erweiterungen immer zu Lasten der Auswertedauer gehen.

Um die Trefferquote der Identifizierung der Tür im Gebäudemodell zu erhöhen, könnten die Zielmarken noch vereinfacht werden. Momentan wird die Türinformation in einem 12bit-Code codiert, d. h. 4096 Türen können unterschieden werden. Da in öffentlichen Gebäuden die Anzahl verschiedener Türen meist kleiner ist, könnte der Code noch reduziert werden. Dadurch würde sich die Geometrie der Zielmarke vereinfachen und sie könnte in größerer Entfernung dekodiert werden.

**Stützung durch weitere Sensoren:** Um die Schwächen des OIPS zu kompensieren, könnte es mit Mikroelektronischen Mechanischen Systemen (MEMS) kombiniert werden. MEMS beinhalten meist Beschleunigungssensoren, die, wie auch Digitalkameras, häufig in modernen Smartphones integriert sind (siehe dazu Abbildung 8.3). Damit könnte die Verdrehung der Aufnahme ausfindig gemacht werden und dadurch ein rechenintensiver Teilschritt des Bildverarbeitungsprozesses ersetzt werden. Weiterhin könnte die Orientierung des Smartphones anhand eines integrierten Kompasses ermittelt und zum Vergleich mit der Orientierung anhand der Kameraaufnahme genutzt werden.

**Weitere Referenzobjekte:** Nicht alle Gebäude besitzen geschlossene Türen, wie in der verwendeten Testumgebung. Daher müsste das System noch um weitere markante Objekte in einem Gebäudemodell wie Säulen oder Treppen als Referenzobjekte erweitert werden, um den Einsatzbereich der Positionierung zu vergrößern. In manchen Fällen würden dadurch mehr als vier Referenzpunkte zur Verfügung stehen und die Position könnte überbestimmt und damit genauer ermittelt werden.



## 10.4 Anwendungsanalyse

Örtlichkeiten zur Indoorpositionierung sind öffentliche Einrichtungen aller Art, z. B. Museen, Bürogebäude, Kliniken aber auch Flughäfen, Industriehallen oder Parkhäuser. Die Positionsbestimmung dient hier zumeist als Voraussetzung für standortbezogene Dienste (LBS). Zum einen können Informationen über den aktuellen Aufenthaltsort (Positionierung) abgefragt werden oder der Nutzer kann von diesem Standpunkt zu einem nächsten Point Of Interest (POI) (Büro, Toilette, Parkplatz etc.) geleitet (Routing) werden.

Augmented Reality (AR) wird im Außenbereich vermehrt auch in Smartphone-Applikationen (App) eingesetzt. Dabei werden dem Nutzer bei Aufnahme einer bestimmten Örtlichkeit Informationen aller Art im Livebild eingeblendet (Abbildungen 10.1-a, -b). Der Standort wird dabei über GPS ermittelt. Auch für den Indoorbereich gibt es mittlerweile Smartphone-Applikationen, die für Messegelände angeboten werden, z. B. von First Media (2009). Die Position wird in diesem Fall aus der verfügbaren WLAN-Infrastruktur abgeleitet (Abbildung 10.1-c).



Abbildung 10.1: Smartphone-Applikationen aus dem Bereich Augmented Reality (Quellen: a) Immonet (2011), b) Technik-Junkie (2011), c) First Media GmbH (2011))

Mit einer mittleren Punktabweichung von  $d_P \approx 35$  cm liefert das in dieser Arbeit konzipierte OIPS eine genauere Position als WLAN und wäre daher sogar besser zur Positionsangabe für ein AR-System geeignet. Da die Auswertung und Übertragung der Bilddaten derzeit noch zu viel Zeit in Anspruch nimmt ( $\approx 50$  sec) und die Trefferquote noch nicht ausreicht, kann das OIPS in der Praxis jedoch noch nicht als eigenständiges Gebäudeleitsystem genutzt werden.

Durch Kombination mit einem WLAN-IPS können Teile der OIPS-Auswertung wegfallen. Mit WLAN kann der Bereich (Raum), in dem sich eine Person aufhält, bestimmt werden, so dass die Anzahl möglicher Türkandidaten stark eingeschränkt wäre (in der Regel 1-2 Türen). Dadurch würde sich die Prozesszeit des

OIPS verkürzen und die Position weiterhin präziser bestimmt werden als nur durch das näherungs-basierte WLAN-IPS.

Weiterhin könnte das OIPS in Kombination mit autonomen Dead-Reckoning-Navigationssystemen genutzt werden. Mit Dead-Reckoning-Systemen wird nur ein relativer Pfad ermittelt. Die Startposition muss anderweitig bestimmt werden, z. B. anhand von GPS (Beauregard, 2006). Die Sensoren für ein Dead-Reckoning-Verfahren, die in aktuellen Smartphones verbaut sind, liefern keine ausreichend stabilen Werte, so dass die Zuverlässigkeit des Dead-Reckoning-Tracks sehr schnell abnimmt. OIPS könnten in diesem Falle als Stützung dienen, indem sie durch Positionsbestimmung an vereinzeltten Punkten im Gebäude den Track kontrollieren.

Ein hybrides *Positionierungs- und Navigationssystem* (PNS), bestehend aus GPS, WLAN, MEMS und Kamera wäre z. B. in folgendem Szenario denkbar: Ein Tourist ist mit dem Mietwagen in einer fremden Stadt unterwegs und möchte dort eine Kunstaussstellung besuchen. Die hybride PNS-Applikation auf seinem Smartphone leitet ihn mittels GPS zum nächstgelegenen Parkhaus. An seinem Parkplatz fotografiert der Tourist mit seiner Smartphone-Kamera die in einem QR-Code codierte Parkplatznummer. Das OIPS ermittelt den aktuellen Standort des Touristen und zeigt seine aktuelle Position auf dem Smartphone an. Zugleich wird ihm auf dem Smartphone-Display die Route vom Parkplatz zur Ausstellung eingeblendet. Auf der Ausstellung gefällt dem Tourist ein Gemälde ganz besonders. Durch Fotografieren der codierten Tür wird ermittelt, vor welchem Gemälde der Tourist gerade steht. Ihm werden sämtliche Informationen über das Gemälde angezeigt und weitere Räume der Ausstellung vorgeschlagen, in denen sich Gemälde aus der gleichen Epoche oder vom gleichen Maler befinden. Der Tourist wählt einen Vorschlag aus und wird durch Aktivierung der MEMS-Sensoren zu seinem Wunschziel geführt. Nach seinem Besuch möchte der Tourist nun wieder zu seinem Auto gelangen. Mittels GPS wird er wieder bis zum Parkhauseingang geleitet. Hier fotografiert der Tourist wieder eine codierte Tür, seine aktuelle Position wird ermittelt und mit Hilfe von MEMS und OIPS wird er zurück zu seinem Auto geführt.

Im Bereich der präzisen Indoorpositionierung, wie beispielsweise für die detaillierte Gebäudemodellierung erforderlich, kann das untersuchte OIPS nicht als eigenständiges System verwendet werden. Allerdings könnte es hier zur Verknüpfung der durch ein präzises IPS (z. B. Laserscanning) lokal ermittelten Koordinaten mit dem übergeordneten Gebäudemodell dienen.

Durch die Abhängigkeit von der Infrastruktur kann das OIPS nur sehr eingeschränkt zur Baufortschrittsdokumentation eingesetzt werden. Es müssen zumindest vereinzelt ausgewiesene Referenzobjekte, wie die in dieser Arbeit verwendeten codierten Türen, vorhanden sein.

## 11 Abschließendes Fazit

Die Ergebnisse der theoretischen Genauigkeitsabschätzungen für eine bildbasierte Positionsbestimmung haben gezeigt, dass es mit der Qualität aktueller Smartphone-Kameras möglich ist, eine Positionsbestimmung im Bereich weniger dm zu erreichen.

Die Umsetzung in der Praxis bestätigt diese theoretischen Abschätzungen. Tendenziell liegen die Abweichungen mit einer Punktabweichung  $d_P \approx 0,35$  m in der Praxis etwas höher. Berücksichtigt man jedoch die zusätzlichen, in der Theorie nicht modellierten Einflüsse, bestätigen die Ergebnisse der praktischen Messungen durchaus die Theorie. Im modellierten Vergleich zu derzeitigen Low Cost Alternativen wie WLAN oder RFID basierten Systemen, liefert ein Optisches Indoorpositionierungssystem bei äquivalentem oder sogar geringerem Einrichtungsaufwand in jedem Falle die genaueren Ergebnisse.

Die Zukunft von IPS liegt generell darin, die Schwächen einzelner Sensoren auszuschalten, indem einzelne Messsysteme zu einem hybriden Sensorsystem kombiniert werden. Die Schwächen des OIPS bezüglich seiner Robustheit würden dann durch alternative Sensoren (WLAN, MEMS usw.) kompensiert werden.

Allgemein eignet sich das in dieser Arbeit realisierte OIPS bereits als eigenständiges System für den praktischen Einsatz bei der Personenortung. Durch schnellere Bildverarbeitungsalgorithmen und eine schnellere Datenübertragung ist sogar denkbar, das System als **Navigationssystem** im Indoorbereich einzusetzen.

Als Präzisionspositionierungssystem ist das entwickelte OIPS aufgrund der Abhängigkeit der Positionsgenauigkeit von der Aufnahmeentfernung und der Schrägstellung der Kamera zur Tür sowie der Genauigkeit der detektierten Punkte im Bild derzeit noch nicht geeignet. Mit besseren optischen Systemen, wie sie in zukünftigen Smartphones durchaus denkbar sind, kann die Positionsgenauigkeit noch weiter verbessert werden und eine Positionsbestimmung mit einer absoluten Punktabweichung im Bereich 1 – 2 dm realisiert werden.



## Literaturverzeichnis

- Aicon (2011): *Homepage der Firma Aicon 3D.systems*, URL <http://www.aicon3d.de/>, last access: 12.12.2011.
- Alby, T. (2008): *Das mobile WEB*, Hanser Verlag.
- Bat-System (2002): *Homepage of the Digital Technology Group*, URL <http://www.cl.cam.ac.uk/research/dtg/attarchive/bat/>, last access: 12.12.2011.
- Bay, H.; Ess, A.; Tuytelaars, T.; Van Gool, L. (2008): *Surf: Speeded Up Robust Features*, in *Computer Vision and Image Understanding (CVIU)*, vol. 110, pp. 346–359.
- Beauregard, S. (2006): *A Helmet-Mounted Pedestrian Dead Reckoning System*. Applied Wearable Computing (IFAWC), vol. 3: 1–11.
- BITKOM (2010): *Presseinformation: Bald mehr als fünf Milliarden Mobilfunkanschlüsse*, URL [http://www.bitkom.org/de/presse/66442\\_64681.aspx](http://www.bitkom.org/de/presse/66442_64681.aspx), last access: 12.12.2011.
- Blankenbach, J. (2007): *Handbuch der mobilen Geoinformation*, Wichmann Verlag.
- Blankenbach, J.; Norrdine, N.; Schlemmer, H.; Willert, V. (2007): *Indoor-Positionierung auf Basis von Ultra Wide Band*. Allgemeine Vermessungsnachrichten, vol. 5: 169–178.
- Breymann, U.; Mosemann, H. (2006): *JavaME, Anwendungsentwicklung für Handys, PDA und CO.*, Carl Hanser Verlag.
- Burger, W.; Burge, M. J. (2006): *Digitale Bildverarbeitung - Eine Einführung mit Java und ImageJ*, Springer Verlag, 2. edn..
- CeBit (2012): *Homepage der Fachmesse CeBit*, URL <http://www.cebit.de/>, last access: 29.12.2011.
- Diefenbach, N. (2011): *Untersuchung von automatisierten Verfahren zur Detektion markanter Punkte in einem Digitalfoto*, Bachelorthesis, Geodätisches Institut, FG Geodätische Messsysteme und Sensorik, TU Darmstadt.
- Douglas, D.; Peucker, T. (1973): *Algorithms for the reduction of the number of points required to represent a digitized line or its caricature*. The Canadian Cartographer, vol. 10: 112–122.
- Efford, N. (2000): *Digital Image Processing - A Practical Introduction Using Java*, Addison Wesley.
- Ekahau (2011): *Homepage der Firma Ekahau*, URL <http://www.ekahau.com>, last access: 12.12.2011.
- Etzel, J. (2010): *Automatisierte Detektion von Türen in einem Digitalfoto*, Diplomarbeit, Geodätisches Institut, FG Geodätische Messsysteme und Sensorik, TU Darmstadt.

- Farley, J.; Crawford, W.; Flanagan, D. (2003): *Java Enterprise In A Nutshell*, O'Reilly Verlag, 1. edn..
- Fawcett, T. (2005): *An introduction to ROC analysis*. Pattern Recognition Letters, vol. 27: 861–874.
- Filonenko, V.; Cullen, C.; Carswell, J. (2010): *Investigating Ultrasonic Positioning on Mobile Phones*, in *International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation*, Zürich, Switzerland.
- First Media (2009): *Homepage der First Media GmbH*, URL <http://www.firstmedia.de/>, last access: 09.12.2011.
- First Media GmbH (2011): *Homepage der First Media GmbH: Blogeintrag zu Smartphone-Apps auf Messen*, URL <http://blog.firstmedia.de/2011/04/27/smartphone-apps-messen-augmented-reality-und-indoor-navigation/>, last access: 09.12.2011.
- Förstner, W. (2000): *Moderne Orientierungsverfahren*, Tech. Rep. 3, Photogrammetrie-Fernerkundung-Geoinformation.
- Gallagher, T.; Li, B.; Dempster, A.; Rizos, C. (2010): *A sector-based campus-wide indoor positioning system*, in *International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation*, Zürich, Switzerland.
- Gering, S.; Raß, S. (2010): *Positionsbestimmung mittels Handykamera*, Projektseminar Robotik und Computational Intelligence, Vol. 4, SS 2010.
- Grunert, A. J. (1841): *Das Pothenotische Problem in erweiterter Gestalt über seine Anwendungen in der Geodäsie*. Grunerts Archiv für Mathematik und Physik, vol. 1: 238–248.
- Haralick, R. M.; Lee, C.; Ottenberg, K.; Nolle, M. (1994): *Analysis and Solutions of the Three Point Perspective Pose Estimation Problem*. International Journal of Computer Vision, vol. 13/3: 331–356.
- Hartley, R.; Zisserman, A. (2003): *Multiple View Geometry in Computer Vision*, Cambridge University Press, 2. edn..
- Hightower, J.; Boriello, G.; Want, R. (2000): *SpotON: An Indoor 3D Location Sensing Technology Based on RF Signal Strength*, Tech. Rep., UW CSE.
- Hile, H.; Boriello, G. (2008): *Positioning and Orientation in Indoor Environments Using Camera Phones*. IEEE Computer Graphics and Applications, vol. 8: 32–39.
- Hochdorfer, S.; Schlegel, C. (2010): *6 DoF SLAM using a ToF Camera: The challenge of a continuously growing number of landmarks*. International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), IEEE/RSJ, pp. 3981–3986.
- Hopper, A.; Harter, A.; Blackie, T. (1993): *The active badge system*, in *Proceedings of the INTERACT '93 and CHI '93 conference on Human factors in computing systems*, pp. 533–534, ACM, Amsterdam, Netherlands.
- Horn, B. K. P. (1987): *Closed-form solution of absolute orientation using unit quaternions*. Journal of the Optical Society of America A, vol. 4: 629.

- Horn, B. K. P.; Hilden, H. M.; Negahdaripour, S. (1988): *Closed-form solution of absolute orientation using orthonormal matrices*. Journal of the Optical Society of America A, vol. 5: 1127.
- Hu, M.-K. (1962): *Visual pattern recognition by moment invariants*. IRE Transactions on Information Theory, vol. 8: 179–187.
- Immonet (2011): *Pressemitteilung über Immobilien-App Immonet*, URL <http://www.ptext.de/pressemitteilung/immonetde-bringt-immobilien-app-augmented-reality-aufs-iphone-116329>, last access: 24.11.2011.
- Ingensand, H.; Bitzi, P. (2001): *Technologien der GSM-Positionierungsverfahren*. Allgemeine Vermessungsnachrichten, vol. 8-9: 286–294.
- Jehl, G. (2007): *Deterministic WLAN Position Determination*, Tech. Rep., Institut für Informatik, Freiburg, Germany.
- Jähne, B. (2005): *Digitale Bildverarbeitung*, Springer Verlag.
- Jordan; Eggert; Kneisel (1966): *Handbuch der Vermessungskunde, Band VI, Die Entfernungsmessung mit elektromagnetischen Wellen und ihre geodätische Anwendung*, Metzlersche Verlagsbuchhandlung Stuttgart.
- Kaemarungsi, K.; Krishnamurthy, P. (2004): *Modelling of Indoor Positioning Systems Based on Location Fingerprinting*, IEEE Infocom, Hong Kong, China.
- Khoshelham, K. (2010): *Automated Localization of a Laser Scanner in Indoor Environments Using Planar Objects*, in *International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation*, Zürich, Switzerland.
- Killian, K. (1955): *Über das Rückwärtseinschneiden im Raum*. Österreichische Zeitschrift für Vermessungswesen, vol. 4: 97–104.
- Kitasuka, T.; Nakanishi, T.; Fukuda, A. (2003): *Wireless LAN based indoor positioning system WiPS and its simulation*. Communications, Computers and Signal Processing, vol. 1: 272–275.
- Kleusberg, A. (1994): *Die direkte Lösung des räumlichen Hyperbelschnitts*. Zeitschrift für Vermessungswesen, vol. 4: 188–192.
- Klopschitz, M.; Schall, G.; Schmalstieg, D.; Reitmayr, G. (2010): *Visual Tracking for Augmented Reality*, in *International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation*, Zürich, Switzerland.
- Koyuneu, H.; Yang, S. H. (2010): *A Survey of Indoor Positioning and Object Locating Systems*. International Journal of Computer Science and Network Security, vol. 10: 121–128.
- Kraus, K. (1996): *Photogrammetrie - Verfeinerte Methoden und Anwendungen, Band 2*, Dümmler Verlag, Bonn.
- Kroschel, K.; Roigoll, G.; Schuller, B. (2011): *Statistische Informationstechnik - Signal- und Mustererkennung, Parameter- und Signalschätzung*, vol. 5, Springer.

- Kyle, S. A. (1990): *A modification to the space resection*. Allgemeine Vermessungsnachrichten, vol. 7: 17–25.
- Lowe, D. (1999): *Object recognition from local scale-invariant features*, in *International Conference on Computer Vision*, pp. 1150–1157, Corfu, Greece.
- Luhmann, T. (2010a): *Erweiterte Verfahren zur Kamerakalibrierung in der Nahbereichsphotogrammetrie*, in *Reihe C*, 645, Deutsche Geodätische Kommission, Habilitationsschrift.
- Luhmann, T. (2010b): *Nahbereichsphotogrammetrie - Grundlagen, Methoden und Anwendungen*, Wichmann Verlag.
- MacKay, D. J. C. (2003): *Information Theory, Inference, and Learning Algorithms*, Cambridge University Press.
- MATLAB Builder JA (2011): *MATLAB Builder JA (for Java language)*, URL <http://www.mathworks.de/products/javabuilder/>, last access: 12.12.2011.
- Mautz, R.; Tilch, S. (2010): *Innenraumpositionierung mit optischen Methoden*. Allgemeine Vermessungsnachrichten, vol. 7: 250–255.
- Mulloni, A.; Wagner, D.; Schmalstieg, D. (2009): *Indoor Positioning and Navigation with Camera Phones*. Pervasive Computing, vol. 8: 22–31.
- Niemeier, W. (2002): *Ausgleichsrechnung*, Walter de Gruyter.
- Norrdine, A. (2008): *Direkte Lösung des räumlichen Bogenschnitts mit Methoden der linearen Algebra*. Allgemeine Vermessungsnachrichten, vol. 1: 7–9.
- Norrdine, A. (2009): *Präzise Positionierung und Orientierung innerhalb von Gebäuden*, Dissertation im FB Bauingenieurwesen und Geodäsie, FG Geodätische Messsysteme und Sensorik, TU Darmstadt.
- Ochotta, T. (2002): *Regionenbasierte Partitionierung bei fraktaler Bildkompression mit Quadrees*, Master's thesis, Universität Leipzig, Fakultät für Mathematik und Informatik.
- Pedram, A.; Gockel, T.; Dillmann, R. (2007): *Computer Vision: Das Praxisbuch*, Elektor Verlag, Aachen, 1. edn..
- Pflug, C. (2008): *Ein Bildinformationssystem zur Unterstützung der Bauprozesssteuerung*, Dissertation im FB Bauingenieurwesen und Geodäsie, FG Baubetrieb, TU Darmstadt.
- Priyantha, N. B. (2005): *The Cricket Indoor Location System*, Ph.D. thesis, Massachusetts Institute of Technology.
- Qualysis (2011): *Homepage der Firma Qualisys-Motion Capture Systems*, URL <http://www.qualisys.com>, last access: 12.12.2011.
- Real Ehrlich, C. (2010): *3D-Innenraummodellierung - Von der Datenerfassung bis zur Visualisierung auf Basis eines geometrisch-topologischen Datenmodells*, Diplomarbeit, Geodätisches Institut, FG Geodätische Messsysteme und Sensorik, TU Darmstadt.



- Rizos, C.; Barnes, J. (2010): *Experimental results of Locata: A high accuracy indoor positioning system*, in *International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation*, Zürich, Switzerland.
- Rohrberg, K. (2009): *Geschlossene Lösung für den räumlichen Rückwärtsschnitt mit minimalen Objektinformationen*, in *Oldenburger 3D Tage*, pp. 332–339, Wichmann Verlag, Heidelberg.
- Roth, J. (2002): *Mobile Computing*, dpunkt.verlag.
- Schmitt, P. (2009): *Displaytechnik bei Handys - von Dot Matrix bis OLED*, URL <http://www.24mobile.de/blog>, last access: 12.12.2011.
- Schwendemann, J.; Müller, T.; Krautschneider, R. (2010): *Indoor navigation of machines and measuring devices with iGPS*, in *International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation*, Zürich, Switzerland.
- Singer, P.; Ströbel, D.; Hördt, R.; Bahndorf, J.; Linkwitz, K. (1993): *Direkte Lösung des räumlichen Bogenschnitts*. Zeitschrift für Vermessungswesen, vol. 1: 21–24.
- Sky-Trax (2009): *Homepage der Firma Sky-Trax*, URL <http://www.sky-trax.com>, last access: 12.12.2011.
- Skyhook (2011): *Homepage der Firma Skyhook*, URL <http://www.skyhookwireless.com>, last access: 12.12.2011.
- Technik-Junkie (2011): *Homepage von Technik-Junkie: Kategorie MOBILE*, URL <http://technik-junkie.de/mobile/2011/06/09/augmented-reality-die-technik-des-21-jahrhunderts/>, last access: 12.12.2011.
- Thienelt, M.; Eichhorn, A.; Reiterer, A. (2006): *Kartenunabhängige Fußgängerortung - Prototyp eines wissensbasierten Kalman-Filters (WiKaF)*. Zeitschrift für Vermessungswesen, vol. 4: 183–190.
- UbiSense (2005): *Homepage der Firma Ubisense*, URL <http://www.ubisense.net>, last access: 01.04.2011.
- Werner, M.; Kessel, M.; Marouane, C. (2011): *Indoor Positioning Using Smartphone Camera*, in *International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN), Abstract Volume*, Guimarães, Portugal.
- Willert, V. (2009): *Genauigkeitsuntersuchungen einer Handykamera*, Vortrag auf der Veranstaltungsreihe *Geodätische Woche* (nicht publiziert), Karlsruhe, 2009.
- Willert, V. (2010): *Bildbasierte Indoor-Positionierung - Bestimmung der Position in Indoor-Szenarien mit einer Handykamera*. Allgemeine Vermessungsnachrichten, vol. 7: 256–263.
- Willert, V. E.; Willert, V. V.; Gering, S.; Raß, S.; Etzel, J. (2011): *Automated extraction of image coordinates for Optical Indoor Positioning*, in *International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN), Abstract Volume*, Guimarães, Portugal.
- World Mobile Congress (2012): *Homepage der Fachmesse World Mobile Congress*, URL <http://www.mobileworldcongress.com/>, last access: 29.12.2011.

Wrobel, B. P. (2001): *Calibration and Orientation of Cameras in Computer Vision*, Gruen. A and Huang, T. S.

## Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen bedanken, die mich in meiner Zeit am Geodätischen Institut der TU Darmstadt begleitet und bei meiner Doktorarbeit unterstützt haben.

Als erstes möchte ich mich bei meinem Doktorvater Prof. Dr.-Ing. Andreas Eichhorn bedanken, der mich in allen Belangen unterstützt hat und ein immerwährendes, umfassendes Interesse an meiner Arbeit gezeigt hat.

Weiterhin danke ich Prof. Dr.-Ing. habil. Volker Schwieger für die freundliche Übernahme des Korreferats und seine konstruktive Kritik an meiner Arbeit. Außerdem möchte ich mich bei Prof. Dr.-Ing. habil. Harald Schlemmer bedanken, der mir die Promotion am Geodätischen Institut ermöglicht und mich mit wertvollen Tipps in der Anfangsphase dieser Arbeit unterstützt hat.

Des Weiteren möchte ich mich bei meinen Kollegen für die vielen Anregungen, Diskussionen und die fachliche Unterstützung bei der Umsetzung meiner Arbeit bedanken. Insbesondere gilt mein Dank an dieser Stelle Dr.-Ing. Milo Hirsch, Dr.-Ing. Jörg Blankenbach, Dr.-Ing. Abdelmoumen Norrdine sowie Dipl.-Inf. Eduard Gasparian. Weiterhin möchte ich allen Studenten danken, die die Ergebnisse meiner Arbeit durch ihre Bachelor-, Master- oder Seminararbeit mit Leben gefüllt haben.

Danke auch meinem Bruder Dr.-Ing. Volker Willert für die fachlichen Diskussionen und zahlreichen Anregungen bei meiner Arbeit sowie meinem Schwiegervater Dr. Erich Händler für das gewissenhafte Korrekturlesen.

Ein großes Dankeschön geht an meine Eltern und Geschwister, die immer ein Ruhepol auch in anstrengenden Phasen waren und stets ein offenes Ohr für mich hatten.

Last but not least danke ich ganz besonders meinem Ehemann Steffen, der mir in allen Lebenslagen zur Seite gestanden und mich mit seiner Geduld und Zuwendung immer unterstützt und motiviert hat.



# Curriculum Vitae

## Persönliche Daten

Verena Erika Händler, geb. Willert  
geboren am 01.08.1981 in Lohr am Main (Unterfranken)

## Ausbildung

1988-1992	Grundschule Lohr am Main
1992-2001	Franz Ludwig von Erthal Gymnasium
2001-2006	Studium des Vermessungswesens an der Technischen Universität Darmstadt
2006	Abschluss: Diplom-Ingenieurin (Dipl.-Ing.)

## Arbeitstätigkeiten

2002	Praktikum im Außendienst bei Ingenieurbüro ÖbVI Kolb und Zinn, Darmstadt
2004	Arbeit als Werkstudentin in der Abteilung Engineering-Services/Messtechnik, Vorarlberger Illwerke AG
2004-2005	Studentische Hilfskraft am Photogrammetrischen Institut der TU Darmstadt
2006	Studentische Hilfskraft am Geodätischen Institut der TU Darmstadt
2006-2012	Wissenschaftliche Mitarbeiterin am Geodätischen Institut der TU Darmstadt
seit Juni 2012	Software Spezialistin bei ESG GmbH, München

## ***Schriftenreihe Fachrichtung Vermessungswesen (ab 1996)***

Heft Nr. 1	J. SHEN	Entwicklung eines dreidimensionalen Online-Messsystems; Darmstadt 1996 ISBN 978-3-9804926-0-7
Heft Nr. 2	D. FLOHRSCHÜTZ	Untersuchungen zum Einsatz von 3D-Animationen im Vermessungswesen; Darmstadt 1998 ISBN 978-3-9804926-1-4
Heft Nr. 3	Fachbereich Vermessungswesen	Jahresbericht 1998; Darmstadt 1999 ISBN 978-3-9804926-2-1
Heft Nr. 4	J. HARTMANN R. SEuß K. ZIMMERMANN	Pilothafte Realisierung des ALKIS®/ATKIS®-Datenmodells zur Abbildung bestehender und zukünftiger Anforderungen der Geodatenhaltung in der Hessischen Kataster- und Vermessungsverwaltung; Darmstadt 2000 ISBN 978-3-9804926-3-8
Heft Nr. 5	M. SEuß	Raumbezogene Planung - ein Gegenstand der Automation? Darmstadt 2000 ISBN 978-3-9804926-4-5
Heft Nr. 6	R. SEuß	Implementierung und Nutzung eines Kommunalen Geoinformationssystems auf Landkreisebene; Darmstadt 2000 ISBN 978-3-9804926-5-2
Heft Nr. 7	Schriftenreihe Fachrichtung Geodäsie	Jahresbericht 1999; Darmstadt 2000 ISBN 978-3-9804926-6-9
Heft Nr. 8	E. BARTSCH	In ländlichen Räumen der VR China; Darmstadt 2000 ISBN 978-3-9804926-7-6
Heft Nr. 9	J. HARTMANN CH. HEIL R. SEuß	Pilothafte Realisierung des ALKIS® / ATKIS®-Datenmodells zur Abbildung bestehender und zukünftiger Anforderungen der Geodatenhaltung in der Hessischen Kataster- und Vermessungsverwaltung, Teil II; Darmstadt 2000 ISBN 978-3-9804926-8-3
Heft Nr. 10	Autorenteam	Festschrift anlässlich der Vollendung des 65. Lebensjahres von Prof. Dr. Ing. Bernhard P. Wrobel Darmstadt; 2000 ISBN 978-3-9804926-9-0
Heft Nr. 11	Schriftenreihe Fachrichtung Geodäsie	Jahresberichte 2000; Darmstadt 2001 ISBN 978-3-35631-00-6
Heft Nr. 12	Schriftenreihe Fachrichtung Geodäsie	Jahresberichte 2001; Darmstadt 2002 ISBN 978-3-935631-01-3
Heft Nr. 13	J. HARTMANN	Umsetzung und prototypische Entwicklung zur zukünftigen Führung des Liegenschaftskatasters (ALKIS); Darmstadt 2002 ISBN 978-3-935631-02-0
Heft Nr. 14	R.-H. BORCHERT	Struktur eines Daten-Kommunikations-Kernsystems für den

---

		Geoinformationsmarkt; Darmstadt 2002 ISBN 978-3-935631-03-7
Heft Nr. 15	V. STAHL	Entwicklung eines interdisziplinären QM- Systems im Ingenieursektor; Darmstadt 2002 ISBN 978-3-935631-04-4
Heft Nr. 16	Schriftenreihe Fachrichtung Geodäsie	Jahresberichte 2002; Darmstadt 2003 ISBN 978-3-935631-05-1
Heft Nr. 17	Schriftenreihe Fachrichtung Geodäsie	Jahresberichte 2003; Darmstadt 2004 ISBN 978-3-935631-06-8
Heft Nr. 18	Schriftenreihe Fachrichtung Geodäsie	Jahresberichte 2004; Darmstadt 2005 ISBN 978-3-935631-07-5
Heft Nr. 19	S.-H. KLEBER	Beitrag zur ALKIS-Implementierung in Hessen und Untersuchung der Anwendersicht; Darmstadt 2005 ISBN 978-3-935631-08-2
Heft Nr. 20	M. VOGEL	Vom Pixel zur Richtung - Die räumlichen Beziehungen zwischen Abbildungsstrahlen und Tachymeter-Richtungen; Darmstadt 2006 ISBN 978-3-935631-09-9
Heft Nr. 21	Schriftenreihe Fachrichtung Geodäsie	Jahresberichte 2005; Darmstadt 2006 ISBN 978-3-935631-10-5
Heft Nr. 22	M. METZNER	Schaffung einer einheitlichen kommunalen Informationsbasis durch die Integration von Geodaten; Darmstadt 2006 ISBN 978-3-935631-11-2
Heft Nr. 23	D. WENZEL	Einsatz von unabhängigen Prüfverfahren und modernen Testwerkzeugen zur Qualitätssteigerung in der Geoinformatik; Darmstadt 2006 ISBN 978-3-935631-12-9
Heft Nr. 24	A. HENDRICKS	Einsatz von städtebaulichen Verträgen nach § 11 BauGB bei der Baulandbereitstellung - eine interdisziplinäre theoretische Analyse und Ableitung eines integrierten Handlungskonzeptes für die Praxis; Darmstadt 2006 ISBN 978-3-935631-13-6
Heft Nr. 25	TH. ROSSMANITH	Prototypische Realisierung einer kommunalen Geodaten-infrastruktur auf Landkreisebene; Darmstadt 2007 ISBN 978-3-935631-14-3
Heft Nr. 26	A. ADAMS	Vergleich und Optimierung von GIS-basierten Planungen in der Kommunikationstechnik; Darmstadt 2007 ISBN 978-3-935631-15-0
Heft Nr. 27	Autorenteam	Festschrift anlässlich der Vollendung des 65. Lebensjahres von Prof. Dr.-Ing. Harald Schlemmer; Darmstadt 2007 ISBN 978-3-935631-16-7

---

Heft Nr. 28	Autorenteam	Festschrift anlässlich der Vollendung des 65. Lebensjahres von Prof. Dr.-Ing. Carl-Erhard Gerstenecker; Darmstadt 2008 ISBN 978-3-935631-17-4
Heft Nr. 29	A. NORRDINE	Präzise Positionierung und Orientierung innerhalb von Gebäuden; Darmstadt 2009 ISBN 978-3-935631-18-1
Heft Nr. 30	Autorenteam	Festschrift anlässlich der Pensionierung von Dr.-Ing. Rolf-Dieter Düppe nach 36 Jahren am Institut für Photogrammetrie und Kartographie; Darmstadt 2010 ISBN 978-3-935631-19-8
Heft Nr. 31	H. SCHLEMMER	100 Jahre Geodätisches Institut und 150 Jahre Geodäsie an der Technischen Universität Darmstadt; Darmstadt 2010 ISBN 978-3-935631-20-4
Heft Nr. 32	M. SCHAFFERT	Szenariotechnik und GIS - Ein Beitrag zur demographierobusten Planung in Kommunen; Darmstadt 2011 ISBN 978-3-935631-2-1
Heft Nr. 33	S. RÖDELSPERGER	Real-time Processing of Ground Based Synthetic Aperture Radar (GB-SAR) Measurements, Darmstadt 2011 ISBN 978-3-935631-22-8
Heft Nr. 34	T. KÖHLER	Verwaltungsreform im ländlichen Raum - Ein Diskussionsbeitrag; Darmstadt 2011 ISBN 978-3-935631-23-5
Heft Nr. 35	T. FERDINAND	Entwicklung und Realisierung einer Service-plattform für internetbasierte, mobile Geoanwendungen; Darmstadt 2012 ISBN 978-3-935631-24-2
Heft Nr. 36	V. HÄNDLER	Konzeption eines bildbasierten Sensorsystems zur 3D-Indoorpositionierung sowie Analyse möglicher Anwendungen; Darmstadt 2012 ISBN 978-3-935631-25-9



---

## **B. Veröffentlichungen Fachrichtung Vermessungswesen**

### **I. Veröffentlichungen des Geodätischen Institutes (1982 - 1993)**

Heft Nr. 1 - vergriffen-	G. EICHHORN	Zur Höhenfestlegung bei Ingenieurprojekten
	G. EICHHORN	Ausbildung der Vermessungsingenieure für die Bearbeitung von
	G. EICHHORN	Landinformationssystemen
	K. EGREDER	Zur Reproduzierbarkeit des zyklischen Fehlers beim Tellurometer MA 100
	K. EGREDER	Elektrooptische Entfernungsmessung unter Verwendung von
	W. FROHWEIN	Planspiegeln
		Genauigkeitsuntersuchung an Dehnungsmessstreifen- Brückenschaltungen Darmstadt 1982
Heft Nr. 2	O. WOLFRUM	Die Theorie der Normalschnitte und ihre Anwendungen Darmstadt 1984
Heft Nr. 3	H. GROßE	Testnetz der Technischen Hochschule Darmstadt
		Band 1: Geodätische Unterlagen
		Band 2: Die Streckenmessung 1974-1976 und 1981-1985
		Band 3: Streckenverzeichnisse nach den EDM- Richtlinien
		Band 4: Prüfung der Messgeräte von 1974 bis 1986
		Band 5: Auswertung des Testnetzes Darmstadt 1986
Heft Nr. 4	E. WIESER	Aufbau eines kommunalen Landinformationssystems Darmstadt 1986
Heft Nr. 5	E. WIESER	Das Liegenschaftskataster als
	U. BASTIAN	Raumbezugssystem kommunaler und regionaler Landinformationssysteme - Autorenreferate zu Diplomarbeiten - Darmstadt 1987
Heft Nr. 6	C. GERSTENECKER	Festschrift Prof. Günter Paul
	G. EICHHORN	Begrüßung
	W. SEELE	Leben und Wirken von Prof. Dipl.-Ing. Günter Paul
	G. PAUL	Leitmotive für die Landumlegung gestern und heute - zu aktuel-
	G. BRUNKEN	len Anforderungen an Gesetzgebung, Praxis und Wissenschaft
	G. BRUNKEN	Dankansprache
	G. BRUNKEN	Fachwissenschaftliche Arbeiten von Prof. Günter Paul
	C. LONGFEI	Berechnung von Lotabweichungen aus topographischen Massen
	S. RÜHL	Digitalisiertablett als Planimeter
		Eichung von Basislatten

		Ergebnisse meines einjährigen Aufenthalts an der Technischen Hochschule Darmstadt
		Aufbau und Einsatzmöglichkeiten einer Grünflächendatenbank und eines Baumkatasters - Autorreferat - Darmstadt 1987
Heft Nr. 7	H. GROßE	Gewässervermessungen auf Binnenseen und
Band 1		Talsperren - Konzept einer automatischen
-	H. GROßE	Datenerfassung und Auswertung
vergriffen-	H. GROßE	Die Messgeräte
		Die Konzeption einer automatischen
	H. GROßE	Tiefenvermessung eines
		Gewässers
	W. MÜLLER	Ergebnis der ersten Versuche auf dem See
	U. THREIN	der Grube "Prinz von
		Hessen" 1987
		Die Programmgestaltung des Messverfahrens
		Der Zusammenschluss der verschiedenen
		Messsysteme Darmstadt 1989
Heft Nr. 7	H. GROßE	Gewässervermessung auf dem See der Grube
Band 2		"Prinz von Hessen" 1987 und 1988
-	H. GROßE	Die Vermessungsarbeiten auf dem See
vergriffen-	H. GROßE	Ergebnis der Vermessungsarbeiten auf dem
		See und Vorschläge für weitere
	G. BRUNKEN	Verbesserungen
		Automatische Datenverarbeitung der
	K. FAHLBUSCHE	Dreidimensionalen
	H. KRANZ	Koordinaten - Darstellung des
		Seeuntergrundes
		Zur Geologie der Grube Prinz von Hessen
		Geodätische Unterlagen für die
		Gewässervermessung
		Darmstadt 1989
Heft Nr. 8	G. EICHHORN	Organisation, Aufbau und Nutzung eines
	T. RUPPERT	Kommunalen Landinformationssystems KLIS
	I. SOBORN	
	E. WIESER	
	G. BRUNKEN	EDV -gestützte Bearbeitung topographischer
		Geländeaufnahmen von der
		Messwertregistrierung bis zur Kartierung:
		Teil I: Registrierung von Messungsdaten des
		WILD T2000 auf EPSON HX-20 und Auswertung
		auf CMB 8032
		Darmstadt 1988
Heft Nr. 9	E. WIESER	Systemanalytische Aspekte kommunaler
		Landinformationssysteme
	G. BRUNKEN	EDV -gestützte Bearbeitung topographischer
		Geländeaufnahmen
		von der Messwertregistrierung bis zur
		Kartierung:
	G. BRUNKEN	Teil II: Verarbeitung einer
	G. BRUNKEN	Koordinatendatei zu einer Kartierung
		mit Situations- und Höhendarstellung

---

	I. WASSERTHAL	Genaue Azimutbestimmung mit Kreisel MOM Gi-B I
	A. SCHWEITZER	Transformation lokaler Festpunkte mit Abstandsgewichten
		Datenerfassung zum Aufbau einer kommunalen Straßendatenbank und deren Präsentation in einem graphisch-interaktiven System - Autorreferat -
		Untersuchung einer DMS-bestückten Invarbandlatte der Firma
		Nedo hinsichtlich mechanisch und thermisch bedingter
		Längenveränderungen - Autorreferat _
		Darmstadt 1989
Heft Nr. 10	G. EICHHORN T. RUPPERT I. SOBORN G. BRUNKEN	Konzeption und Pilotprojekt eines regionalen Landinformationssystems
		Dreidimensionale Netzausgleichung Darmstadt 1990
Heft Nr. 11	G. BRUNKEN  G. BRUNKEN G. BRUNKEN	Automatisierter Datenfluss von der Punktaufnahme zur Netzausgleichung
		Auswertung topographischer Geländeaufnahmen
		Industriemesssystem IMS und Weiterverarbeitung der gewonnenen Daten - Autorenreferate zu Diplomarbeiten - Darmstadt 1993

## II. Veröffentlichungen des Institutes für Photogrammetrie und Kartographie (1982 - 1987)

Heft Nr. 1	H. DEKER	Arbeiten am Institut zum Einsatz der Elektronik an photogrammetrischen Geräten 1972 - 1980 Darmstadt 1982
Heft Nr. 2	W. LICHTNER (Hrsg.)	Funktion und Gestaltung der Deutschen Grundkarte 1:5000 (THD/DVW Seminar vom 16. bis 18. März 1983 in Darmstadt) Darmstadt 1983
Heft Nr. 3	Autorenteam	Professor Dr.-Ing. Hermann Deker zum 65. Geburtstag Darmstadt 1984
Heft Nr. 4	B. WROBEL	Photogrammetrie III (Vorlesungsskript) Darmstadt 1987

### III. Veröffentlichungen des Institutes für Physikalische Geodäsie (1976 - 1981)

Heft Nr. 1	E. GROTEN	Beiträge zur Gravimetrischen Geodäsie und Gezeitenforschung Erschienen in DGK Reihe B, Nr. 217, 1976
Heft Nr. 2	E. GROTEN	Beiträge zur Physikalischen Geodäsie Erschienen in DGK Reihe B, Nr. 233, 1978
Heft Nr. 3	J. LATKA	Beiträge zur Astronomischen Geodäsie und Geodynamik
	C. GERSTENECKER	The Use of Satellite Gradiometry for the Determination of Gravity Anomalies
	G. HEIN	Beiträge zur simultanen Bestimmung von Breite und Länge mit Zeiss Ni2- Pendelastrolabien
	C. GERSTENECKER	Bestimmung der Schwereanomalien, Lotabweichungen und des Geoides im Oberrheingraben aus zweiten Ableitungen des Schwerepotentials
	C. GERSTENECKER	The Influence of Air Pressure Changes on Precise Gravity Measurements
	C. GERSTENECKER	Ergebnisse der Registrierung der horizontalen Erdgezeitenkomponenten mit Hughes-Tiltmetern in der Gipsgrube Obrigheim
	C. GERSTENECKER	Untersuchung von Sekundenlibellen Luftdruck- und Temperatureinflüsse auf Hughes-Tiltmeter
	E. GROTEN	Anwendung von interferometrischen Messungen in der Geodäsie Darmstadt 1978
Heft Nr. 4	TEIL 1	Physikalische Geodäsie
	B. STOCK	Abbruchfehler bei der Berechnung von Geoidhöhen für verschiedene Integralkerne und Randwerte
	B. STOCK	Genauigkeitsuntersuchungen bei der Berechnung von Lotabweichungen für verschiedene Integralkerne und Randwerte
	H. JOCHEMCZYK	Überlegungen zur Stützpunktverteilung bei Reihenentwicklungen in Kugelflächenfunktionen
	E. GROTEN	Was sind Höhenwertänderungen?
	TEIL II	
	H. JOCHEMCZYK	Ausgleichsrechnung und Statistik
	H. JOCHEMCZYK	Einige Bemerkungen zu linearen Abhängigkeiten bei der Auswertung von VLBI- Messungen
	R. KISTERMANN	Arbeitsstudie zu Maximum-Entropy-Spektral Methoden
	G. HEIN	Überlegungen zur Ausreißersuche in multivariaten Daten Darmstadt 1981